



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

PEKKO KUULA

NAULALEVYRAKENTEIDEN OHJELMALLINEN MITOITUS

Diplomityö

Tarkastaja: Professori Reijo Kouhia  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Teknisten tieteiden tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 5. helmi-  
kuuta 2014

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

**KUULA, PEKKO:** Naulalevyrakenteiden ohjelmallinen mitoitus

Diplomityö, 80 sivua

Huhtikuu 2014

Pääaine: Koneiden ja rakenteiden analysointi

Tarkastaja: Professori Reijo Kouhia

Avainsanat: Naulalevy, naulalevyrakenne, NR, puu, Eurocode 5, EC5, Ohjelmointi

Suomessa monet kattoristikot valmistetaan puusauvoista, joiden väliset liitokset toteutetaan naulalevyillä. Naulalevy on metallinen levy, johon on meistetty piikkejä. Nämä piikit uppoavat puuhun liittäen puun ja naulalevyn toisiinsa. Tällaisia ristikoita kutsutaan yleisesti naulalevyrakenteiksi.

Diplomityön tarkoituksena oli ohjelmoida mitoituskomponentti naulalevyristikoiden suunnitteluohjelmaan. Tässä työssä keskitytään avaamaan ja selostamaan naulalevyrakenteiden lujuuslaskennassa vaadittavia periaatteita ja vaatimuksia ohjelmoitavassa muodossa. Työssä paneudutaan erityisesti suunnitteluohjeiden yksityiskohtien tulkinnaan.

Työssä esitetään esimerkkirakenteen laskenta toteutetulla ohjelmalla ja vertaillaan erilaisten mallinnustapojen vaikutusta tuloksiin. Tuloksia vertaillaan toisen suunnitteluohjelman kanssa.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Mechanical Engineering

**KUULA, PEKKO:** Programmatical design of nailplate structures

Master of Science Thesis, 80 pages

April 2014

Major: Analysis of machines and structures

Examiner: Professor Reijo Kouhia

Keywords: Nailplate, wood truss, wood, timber, Eurocode 5, EC5, Programming

In Finland many roof trusses are manufactured from wooden members which are joined together using nailplates. A nailplate is a steel plate with punched spikes in it. These spikes attach the nailplate to the wood. These structures are called nail plate trusses.

The goal of this master's thesis was to implement a design component to a nail plate truss design software. This report focuses on opening up the general principles required in the strength calculations of nail plate trusses in a programmable form. Special care is put into the interpretation of the details of the used design codes.

An example calculation of a structure is carried out using the implemented software. Results between different calculation models are compared with each other and another nail plate truss design software.

## ALKUSANAT

Haluan kiittää kaikkia niitä, jotka antoivat tukensa ja apunsa tämän työn tekemisessä. Kiitokset Jussi Jalkaselle ja Reijo Kouhialle, jotka lukivat työni läpi ja kannustivat sen tekemisessä. Erityiskiitos Jyri Tuorille korvaamattomista ohjeista Matlab -ohjelmoinnissa ja työmenetelmissä. Kiitos myös Jussi Junttilalle ja Mikko Folkersmalle, jotka auliisti seurasivat työn edistymistä aitiopaikoilta. Kiitän myös vanhempiani ja ystäviäni henkisestä tuesta työn tekemisessä. Kiitän myös KPM-Engineering OY:ta työn rahoittamisesta.

## SISÄLLYS

Käsitteet ja merkinnät.....	vi
1 Johdanto .....	1
1.1 Naulalevy rakenne .....	1
1.2 Diplomityön tarkoitus .....	3
1.3 Diplomityössä käytetyt suunnitteluohjeet .....	3
1.4 Kirjallisuutta puumitoituksesta .....	4
1.5 Naulalevyrakenteista tehtyä tutkimusta.....	4
2 Laskentamalli .....	5
2.1 Yksinkertainen rakennemalli .....	5
2.2 Yleinen rakennemalli.....	5
2.3 Tarkennettu rakennemalli .....	6
2.4 Efektiivinen tartunta pinta-ala.....	8
3 Mitoituksen yleiset periaatteet .....	10
3.1 Mitoituksessa tarkistettavat asiat.....	10
3.2 Voimat ja koordinaatistot.....	13
4 Eurocode 5:n mukainen puumitoitus .....	16
4.1 Yleistä.....	16
4.2 Komposiittipalkit .....	18
4.3 Puusauvan poikkileikkauksen mitoitus .....	20
4.3.1 Veto- ja taivutuslujuuden korotus .....	20
4.3.2 Veto .....	20
4.3.3 Puristus .....	21
4.3.4 Taivutus .....	21
4.3.5 Yhdistetty taivutus ja veto .....	21
4.3.6 Yhdistetty taivutus ja puristus.....	22
4.3.7 Stabiilius.....	22
4.3.8 Nurjahdus- ja kiepahduspituudet.....	24
4.3.9 Leikkaus .....	26
4.4 Leimapaine ja kiskopainekorotukset.....	26
4.4.1 Kiskopainekorotus .....	27
4.4.2 Sauvan kiskopainekorotukset.....	28
4.5 Viistosti syihin nähden kohdistuva puristus .....	30
5 Suunnitteluohjeen mukainen liitosmitoitus .....	31
5.1 Yleistä.....	31
5.2 Merkinnät ja käsitteet.....	31
5.2.1 Voimien ja naulalevyjen suuntakulmat .....	31
5.2.2 Sauvojen väliset kontaktipinnat ja levysaumat.....	32
5.3 Tukialueen vahvistaminen naulalevyillä .....	33
5.4 Paarteen halkeaminen liitoksessa .....	36

5.5	Taivutuslujuuden korotus liitossolmun kohdalla.....	39
5.6	Sauvojen väliset puristuskontaktit.....	41
5.6.1	Uumasauvojen välinen kontakti.....	41
5.6.2	Uumasauvan ja paarteen välinen kontakti.....	42
5.6.3	Suora paarrejatkos .....	44
5.6.4	Vino paarrejatkos.....	48
5.7	Levylujuus .....	49
5.8	Tartunta .....	54
5.8.1	Tartuntajännitys ja käyttöaste .....	54
5.8.2	Tartuntalujuus jännityksen suunnan mukaan .....	55
5.9	Vähimmäisvoima.....	56
6	Ohjelman rakenne.....	57
7	Esimerkkitapausten laskenta.....	59
7.1	Esimerkkiristikko.....	59
7.2	Rakennemalli ja staattinen ratkaisu.....	60
7.2.1	Käytetyt laskentamallit .....	60
7.2.2	Ratkaistut voimasuureet.....	61
7.2.3	Epäkeskeisesti mallinnetun tuen vaikutus alapaarteen taivutusmomenttiin. ....	65
7.3	Sauvojen mitoitus .....	66
7.4	Liitosmitoitus.....	67
7.4.1	Käytetty naulalevy .....	67
7.4.2	Liitoksen laskentamalli ja liitosvoimat .....	69
7.4.3	Kontaktit.....	71
7.4.4	Levylujuus ja tartunta .....	72
7.4.5	Paarteen halkeamistarkastelu .....	75
7.4.6	Liitosmitoituksen vertailu eri laskentamallien välillä.....	75
7.4.7	Liitosmitoituksen verifiointi yksinkertaisella paarrejatkoksella .....	76
7.5	Esimerkkilaskennasta tehtävät johtopäätökset .....	77
8	Jatkokehitysideat .....	78
	Lähdeluettelo .....	79

## KÄSITTEET JA MERKINNÄT

$A$	Pinta-ala.
$A_{\text{ef}}$	Sauvan ja naulalevyn välinen efektiivinen tartuntapinta-ala; leikkausvoimalla rasitetun sauvan efektiivinen leikkauspinta-ala.
$a_{\text{left}}$	Puristusalueen vasemman laidan etäisyys sauvan reunaan, viisteeseen tai loveukseen.
$a_{\text{right}}$	Puristusalueen oikean laidan etäisyys sauvan reunaan, viisteeseen tai loveukseen.
$a_{\perp}$	Syihin kohtisuoraan suuntaan tartunta-alasta tehtävä reuna-vähennys.
$a_{\parallel}$	Tartunta-alan reunasta syiden suuntaisesti tehtävä vähennys.
$b$	Puusauvan poikkileikkauksen leveys; kontaktipinnan leveys.
$b_{\text{ef}}$	Leikkauksen tarkastelussa käytetty poikkileikkauksen efektiivinen leveys.
$c$	Naulalevyn sijoitustoleranssi.
$\hat{d}$	Sauvan lokaalin x-akselin suuntainen yksikkövektori liitoksen koordinaatistossa.
$d_e$	Tehollisen tartunta-alan keskimääräinen peittokorkeus syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa.
$E_{0,\text{mean}}$	Keskimääräinen kimmomoduli syiden suunnassa.
$E_{0,05}$	Syiden suuntaisen kimmomodulin 5% fraktiili.
$e_1, e_2$	Momenttipinnan nollakohdan etäisyys liitossolmusta kummallakin puolella..
$e_{\text{max}}$	Momenttipinnan nollakohdan suurempi etäisyys liitossolmusta.
$F$	Voima / voimavektori.
$F_{A,d}$	Naulalevyn kautta naulalevysauman yli välittyvä voima.
$F_{A,Ed}$	Naulalevypiikkien kautta välittyvä kontakteilla redusoitu tartuntavoima.
$F_{c,d}$	Puristuskontaktin kautta välittyvä voima.
$F_d$	Naulalevysauman / kontaktipinnan yli välittyvä kokonaisvoima.

$F_{Ed}$	Tartunta-alan liitosvoiman perusarvo. Puolet sauvan päässä vaikuttavasta voimasta.
$F_{FT}$	Paarretta repivä vetävä voima.
$F_{M,Ed}$	Naulalevysaumaan kohdistuvasta taivutuksesta syntyvä voimapari.
$\bar{F}_{M,Sd}$	Momentin aiheuttama levysaumaan kohdistuva voima vektorimuodossa.
$F_{r,d}$	Vähimmäisvoima, jolle jokainen liitos tulee mitoittaa.
$\bar{F}_{Sd,1}, \bar{F}_{Sd,2}$	Levysaumaa rasittava voima vektorimuodossa
$\bar{F}_{tx}$	Levysauman pääakselin suuntaan rasittavan vetävän voimavektorin suunta.
$\bar{F}_{ty}$	Levysauman sekundaariakselin suuntaan rasittavan vetävän voimavektorin suunta.
$f_{a,0,0,k}$	Tartuntalujuuden ominaisarvo naulalevyn pääakselin ja puun syysuunnan suuntaiselle rasitukselle.
$f_{a,90,90,k}$	Tartuntalujuuden ominaisarvo naulalevyn sekundaariakselin suuntaiselle ja puun syysuuntaan kohtisuoralle rasitukselle.
$f_{a,\alpha,\beta,d}$	Tartuntalujuuden mitoitusarvo kulmien $\alpha$ ja $\beta$ mukaisesti.
$f_{a,\alpha,\beta,k}$	Tartuntalujuuden ominaisarvo kulmien $\alpha$ ja $\beta$ mukaisesti.
$f_{c,0,k}$	Puun syiden suuntaisen puristuslujuuden ominaisarvo; naulalevyn pääakselin suuntaisen puristuslujuuden ominaisarvo.
$f_{c,0,d}$	Puun syiden suuntaisen puristuslujuuden mitoitusarvo.
$f_{c,90,k}$	Syille kohtisuoran puristuslujuuden ominaisarvo; naulalevyn sekundaariakselin suuntaisen puristuslujuuden ominaisarvo.
$f_{c,90,d}$	Syille kohtisuoran puristuslujuuden mitoitusarvo.
$f_{c,\psi,d}$	Puristuslujuuden mitoitusarvo, kun pinnan normaalin ja syiden välinen kulma on $\psi$ .
$f_d$	Yleisen lujuuden mitoitusarvo.
$f_k$	Yleisen lujuuden ominaisarvo.
$f_{m,k}$	Taivutuslujuuden ominaisarvo.
$f_{m,d}$	Taivutuslujuuden mitoitusarvo.
$f_{n,0,k}$	Naulalevyn pääakselin suuntainen ominaislujuus.



$f_{n,90,k}$	Naulalevyn sekundääriakselin suuntainen ominaislujuus.
$f_{t,0,k}$	Syiden suuntaisen vetolujuuden ominaisarvo; naulalevyn pääakselin suuntaisen vetolujuuden ominaisarvo.
$f_{t,0,d}$	Syiden suuntaisen vetolujuuden mitoitusarvo.
$f_{t,90,k}$	Syille kohtisuoran vetolujuuden ominaisarvo; naulalevyn sekundääriakselin suuntaisen vetolujuuden ominaisarvo.
$f_{t,90,d}$	Syille kohtisuoran vetolujuuden mitoitusarvo.
$f_{v,0,k}$	Naulalevyn pääakselin suuntaisen leikkauslujuuden ominaisarvo.
$f_{v,90,k}$	Naulalevyn sekundääriakselin suuntaisen leikkauslujuuden ominaisarvo.
$f_{v,k}$	Leikkauslujuuden ominaisarvo.
$f_{v,d}$	Leikkauslujuuden mitoitusarvo.
$G_{\text{mean}}$	Keskimääräinen liukumoduli.
$G_{0,05}$	Liukumodulin 5% fraktiili.
$h$	Puusauvan poikkileikkauksen korkeus.
$h_e$	Puolet vinossa paarrejatkoksesta vaikuttavan kontaktipinnan pituudesta.
$I_p$	Tartunta-alan polaarinen jäyhyysmomentti.
$I_v$	Poikkileikkauksen vääntöneliömomentti.
$I_y$	Poikkileikkauksen neliömomentti y –akselin suhteen.
$i_y$	Sauvan neliösäde vahvemman akselin suhteen.
$K_{F,\alpha}$	Naulalevyn keskimääräinen siirtymäkerroin kuormitusuuntaan, joka on kulmassa $\alpha$ naulalevyn pääakseliin nähden.
$K_{F,\text{ser}}$	Naulalevyn keskimääräinen siirtymäkerroin kaikkien kuormitussuuntien keskiarvona.
$k$	Levylujuuden laskennassa käytettävä välitulos.
$k_1$	Tartuntalujuuden laskennassa käytetty naulalevykohtainen vakio.
$k_2$	Tartuntalujuuden laskennassa käytetty naulalevykohtainen vakio.
$k_{c,90}$	Materiaalista riippuva kiskopaine kerroin.

$k_{c,y}$	Rakennetason suuntainen nurjahduskerroin.
$k_{c,z}$	Rakennetasolle kohtisuora nurjahduskerroin.
$k_{c,\perp}$	Tukipainekerroin
$k_{crit}$	Kiepahduskerroin.
$k_h$	Puusauvan koosta riippuva kerroin, jolla puun veto- tai taivutuslujuutta voidaan kasvattaa.
$k_{m,1}$	Liitoksen rasituksista ja paarteen momenttipinnan muodosta riippuva kerroin, jolla paarteen paikallista taivutuslujuutta voidaan korottaa.
$k_{m,1,nom}$	Suurin kerroin, jolla kyseistä lujuusluokkaa olevan sauvan lokaalia taivutuslujuutta voidaan korottaa.
$k_{m,1,rel}$	Materiaalista riippumaton kerroin, jolla paarteen paikallista taivutuslujuutta voidaan korottaa.
$k_{mod}$	Ympäristön kosteuden ja kuormituksen keston huomioiva kerroin.
$k_N$	Sauvan ja naulalevyn välisen tartunnan sauvan suuntaista jäykkyyttä kuvaavan jousen jousivakio.
$k_p$	Puun ominaistiheydestä riippuva tartuntalujuuden redusointikerroin.
$k_r$	Sauvan rotaatiojäykkyyttä kuvaava jousivakio.
$k_v$	Sauvalle kohtisuoraa jäykkyyttä kuvaava jousivakio.
$k_v$	Levylujuuden laskennassa käytettävä naulalevykohtainen vakio.
$L$	Pituus.
$L_{c,y}$	Sauvan nurjahduspituus rakennetasossa tapahtuvalle nurjahdukselle.
$l$	Pituus.
$l_0$	Tehollisen tartunta-alan keskimääräinen peittopituus syiden suunnassa.
$l_{1,left}$	Puristusalueen vasemman laidan etäisyys viereiseen puristusalueeseen.
$l_{1,right}$	Puristusalueen oikean laidan etäisyys viereiseen puristusalueeseen.

$l_{ef}$	Kiepahduspituus; naulalevyillä vahvistetun tehollinen naulalevyvahvistuksen pituus.
$l_{c,90,ef}$	Puristusalueen efektiivinen pituus.
$M$	Momentti.
$M_{A,d}$	Naulalevyn kautta naulalevysauman yli välittyvä momentti.
$M_{A,Ed}$	Naulalevypiikkien kautta välittyvä kontakteilla redusoitu tartuntamomentti.
$M_d$	Naulalevysauman / kontaktipinnan yli välittyvä kokonaismomentti.
$M_{Ed}$	Tartunta-alan liitosmomentin perusarvo. Puolet sauvan päässä vaikuttavasta momentista
$M_y$	Sauvassa vaikuttava rakennetason suuntainen taivutusmomentti.
$M_{y,crit}$	Kriittinen taivutusmomentti kiepahdustarkastelussa.
$N$	Sauvan normaalivoima.
$\hat{n}$	Normaalivektori.
$\hat{n}_{edge}$	Reunan normaali reunaliitoksen tapauksessa.
$P_{cr}$	Kriittinen nurjahdusvoima.
$p_{c,\alpha,k}$	Naulalevyn vahvistuslujuuden ominaisarvo.
$Q_z$	Sauvassa vaikuttava rakennetason suuntainen leikkausvoima.
$R_{a,x,d}$	Tartuntakapasiteetti syiden ja naulalevyn pääakselin suuntaiselle rasitukselle.
$R_{cd}$	Kontaktipinnan puristuskapasiteetti.
$R_{c,0,d}$	Syiden suuntainen puristuskapasiteetti.
$R_{c,90,d}$	Syitä vastaan kohtisuora puristuskapasiteetti.
$R_{c,90,d,puu}$	Puun osuus naulalevyillä vahvistetun tuen kapasiteetista.
$R_{c,\psi,d}$	Puristuspinnan puristuskapasiteetti, kun pinnan normaalin ja syiden välinen kulma on $\psi$ .
$R_{FT}$	Paarten kapasiteetti kohtisuoralle vedolle halkeamista tarkasteltaessa.
$R_{x,d}$	Naulalevysauman laskentalujuus x-askelin suuntaiselle rasitukselle.

$R_{y,d}$	Naulalevysauman laskentalujuus y-askelin suuntaiselle rasitukselle.
$ur_{a,x}$	Tartunnan käyttöaste syiden suuntaisen rasituksen suhteen.
$ur_t$	Vedetyn sauvan käyttöaste.
$ur_c$	Puristetun sauvan käyttöaste
$ur_{FT}$	Paarteen halkeamistarkastelun käyttöaste.
$ur_{m,y}$	Primääriakselin suhteen taivutetun sauvan käyttöaste.
$ur_{m,z}$	Sekundääriakselin suhteen taivutetun sauvan käyttöaste.
$ur_m$	Vinosti taivutetun sauvan käyttöaste.
$ur_{mt}$	Taivutetun ja vedetyn sauvan käyttöaste.
$ur_{mc}$	Taivutetun ja puristetun sauvan käyttöaste.
$ur_{c,crit}$	Taivutetun ja puristetun kiepahdusherkän sauvan käyttöaste.
$ur_{t,crit}$	Taivutetun ja vedetyn kiepahdusherkän sauvan käyttöaste.
$ur_v$	Leikkauksella olevan sauvan käyttöaste.
$W_{v,pl}$	Tartunta-alan plastinen kiertymävastus.
$W_y$	Taivutusvastus y-akselin suhteen.
$w$	Paarteen halkeamistarkastelussa käytetty välitulos.
$\hat{X}$	Sauvan lokaalin x-akselin suuntainen yksikkövektori liitoksen koordinaatistossa.
$x$	Sauvan kiepahduspituuden määrittämisessä käytetty kerroin, joka huomioi sauvaan kohdistuvan ulkoisen kuormituksen sijainnin.
$\hat{Z}$	Sauvan lokaalin z-akselin suuntainen yksikkövektori liitoksen koordinaatistossa.
$z_{edge}$	Naulalevyn ja sauvan reunan välisen leikkauksen z-koordinaatti sauvan koordinaatistossa.
$\alpha$	Rasituksen ja naulalevyn pääsuunnan välinen kulma; Puusauvan ja naulalevyn pääsuunnan välinen kulma.
$\alpha_0$	Tartuntalajuuden laskennassa käytetty vakio.

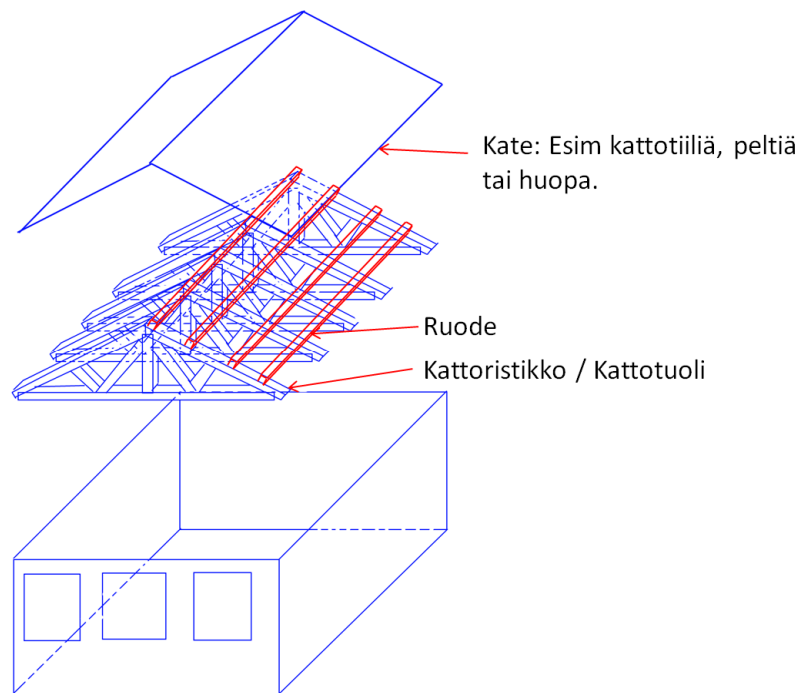
$\beta$	Rasituksen ja puun syysuunnan välinen kulma.
$\beta_c$	Puun alkukäyryydestä riippuva stabiilisuustarkastelussa käytettävä kerroin.
$\gamma$	Naulalevysauman ja naulalevyn pääakselin välinen kulma.
$\gamma_t$	Naulalevysauman ja naulalevyn pääakselin välinen kulma, kun pääakselin suuntainen rasitus on vetoa.
$\gamma_c$	Naulalevysauman ja naulalevyn pääakselin välinen kulma, kun pääakselin suuntainen rasitus on puristusta.
$\lambda_1, \lambda_2$	Sauvan päässä olevan rotaatiojousen jäykkyyteen liittyvä dimensioton suure.
$\gamma_M$	Puun osavarmuusluku; naulalevyteräksen osavarmuusluku, suomessa 1,1; puun ja naulalevyn välisen tartunnan osavarmuusluku, suomessa 1,25.
$\lambda_{rel,m}$	Sauvan suhteellinen hoikkuus kiepahdukselle.
$\lambda_{rel,y}$	Sauvan suhteellinen hoikkuus rakennetasossa tapahtuvalle nurjahdukselle.
$\lambda_y$	Sauvan hoikkuus rakennetasossa tapahtuvalle nurjahdukselle.
$\rho_k$	Puutavaran ominaistiheys.
$\sigma_{c,0,d}$	Syiden suuntaisen puristusjännityksen mitoitusarvo.
$\sigma_{m,crit}$	Kriittinen taivutusjännitys kiepahdustarkastelussa.
$\sigma_{m,y,d}$	y-akselin suuntaisesta taivutuksesta johtuvan jännityksen mitoitusarvo.
$\sigma_{m,z,d}$	z-akselin suuntaisesta taivutuksesta johtuvan jännityksen mitoitusarvo.
$\sigma_{t,0,d}$	Syiden suuntaisen vetojännityksen mitoitusarvo.
$\tau_d$	Leikkausjännityksen mitoitusarvo.
$\tau_{F,d}$	Tartuntavoiman synnyttämä jännitys.
$\tau_{M,d}$	Tartuntamomentin synnyttämä jännitys.
$\psi$	Puun puristuspinnan normaalin ja syiden välinen kulma.

Suunnitteluohjelma	Uuden NR-ohjelman pääohjelmakomponentti.
Mitoitusohjelma	Diplomityössä toteutettu ohjelmakomponentti, joka suorittaa naulalevyrakenteen jälkilaskennan.
Naulalevy rakenne	Naulalevyliitoksilla toteutettu puinen kattoristikko.
Yläpaarre	Sauvat, jotka muodostavat ristikon harjan.
Alapaarre	Ristikon pohjan muodostavat sauvat.
Uumasauva	Ylä- ja alapaarten välissä oleva sauva.
Diagonaali	Viistosti sijoitettu uumasauva.
Vertikaali	Pystysuorasti sijoitettu uumasauva.
Naulalevy	Kattoristikkojen liitoksissa käytetty teräslevy, johon on meistetty piikkejä.
Naulalevylausunto	Naulalevyn mekaanisia ominaisuuksia kuvaava dokumentti, jonka naulalevyvalmistaja tilaa Inspecta Sertifiointi OY:lta. Dokumentti vaaditaan, ennen kuin naulalevyä voidaan käyttää rakenteissa.
Kattotuoli	Toinen nimitys kattoristikolle.
Tartunta-ala	Yksittäisen sauvan osuus naulalevyliitoksessa.

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Naulalevyrakenne

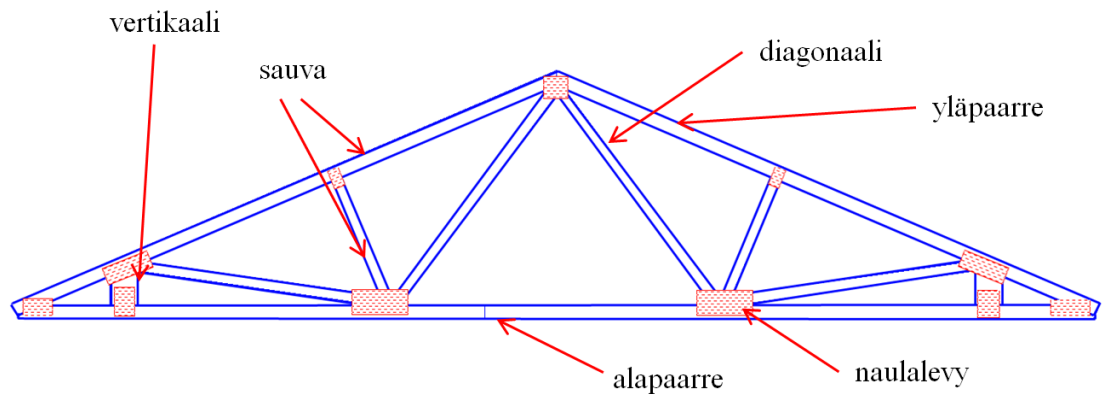
Kattoristikolla tarkoitetaan rakennuksen kattoa kannattelevaa kantavaa rakennetta. Puisen kattoristikon rooli on havainnollistettu kuvassa 1.1. Ristikko lepää esimerkiksi talon seinien päällä. Ristikko on niin kutsuttu primäärikannatin. Kuvan ruoteet toimivat sekundäärikannattimina, jotka välittävät katteelta tulevat kuormitukset ristikolle. Ruoteet toimivat samalla nurjahdustukina ristikon yläpaarteelle.



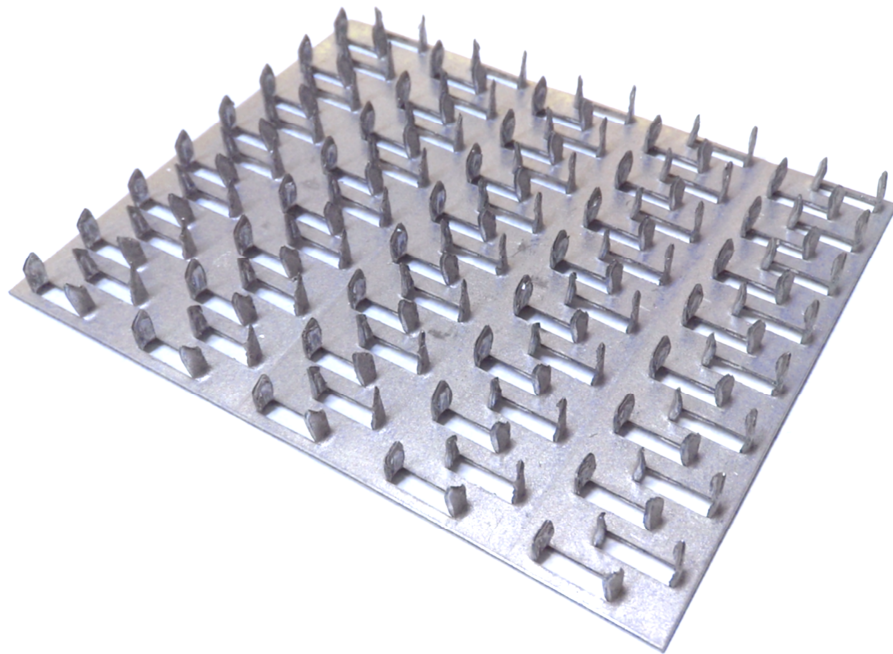
**Kuva 1.1: Kattoristikon rooli.**

Puisen ristikon liitokset toteutetaan naulalevyillä. Yleisesti tällaisia ristikoita kutsutaan naulalevyrakenteiksi – tästä lyhenne NR (1 s. 5). Naulalevyristikoilla voidaan toteuttaa jopa 30 metrin jännevälejä. Tätä suuremmilla jänneväleillä teräsristikko muuttuu kannattavammaksi. Naulalevyristikoita käytetään pientaloissa, tehdashalleissa ja arkkitehtonisesti monimutkaisissa kohteissa, joissa katon muoto on epäsäännöllinen. Naulalevyristikon etuna on hyvä lujuus–paino –suhde ja mahdollisuus toteuttaa erimuotoisia rakenteita. Naulalevyristikko käsitteineen on esitetty kuvassa 1.2. Tässä diplomityössä paarteiden sisäpuolella olevia sauvoja kutsutaan uumasauvoiksi.

Naulalevy on yleensä sinkitetty teräslevy, johon on meistetty piikkejä (1 s. 5) (2). Naulalevyt puristetaan sauvoja vasten ristikon molemmilta puolilta, jolloin piikit pureutuvat puuhun. Naulalevy on esitetty kuvassa 1.3. Rakenteensa vuoksi naulalevyn lujuus riippuu kuormitus suunnasta toisin kuin umpinaisella teräslevyllä.



**Kuva 1.2 Naulalevyristikko ja sen osien nimet.**



**Kuva 1.3: Naulalevy.**

Suomessa on noin 45 naulalevyristikkoa valmistavaa tehdasta. KPM-Engineering:llä ristikkosuunnitelmia tehdään vuosittain n. 19 000-23 000 kpl. Naulalevyrakenteilla ei ole yhteistä kattojärjestöä Suomessa, joten valmistusmääristä ei ole saatavilla valmista tilastoa. Asiantuntija-arvioiden mukaan naulalevyristikoita valmistetaan vuosittain enintään 500 000 kpl. Yhden ristikon hinta on n. 100€, joten bisneksen arvo on karkeasti noin 50 miljoonan euron luokkaa.



Naulalevy-suunnittelijat ja suunnittelun tekoon käytettävät ohjelmat tulee hyväksyä Inspecta Sertifiointi OY:lla. Hyväksytyjä ohjelmia on Suomessa tällä hetkellä (2/2014) neljä kappaletta ja hyväksytyjä NR –suunnittelijoita 51. Listat hyväksytyistä NR -suunnittelijoista ja suunnitteluohjelmista löytyvät Inspecta Sertifiointi OY:n internet sivuilta (3) (4).

## 1.2 Diplomityön tarkoitus

KPM-Engineering OY:ssa on suunniteltu kattoristikoida 70-luvulta asti. Suunnitteluun on käytetty omaa ohjelmaa WoDe vuodesta 1981. Ohjelma on tekniseltä toteutukseltaan vanhahko, minkä seurauksena ohjelman ylläpito on hankalaa. Tämän vuoksi kesällä 2012 aloitettiin uuden suunnitteluohjelman kehittäminen. Uusi suunnitteluohjelma on suunniteltu laajennettavaksi, joten naulalevyrakenteen mitoitus liittyy siihen omana moduulinaan. Pitkällä tähtäimellä ohjelmaan on tavoitteena lisätä tuki muillekin kuin naulalevyrakenteille –esimerkiksi teräkselle ja betonille.

Diplomityön tarkoituksena oli toteuttaa uuteen suunnitteluohjelmaan naulalevyrakenteen mitoitusmoduuli. Jatkossa moduuliin viitataan mitoitusohjelmana. Mitoitusohjelma saa listan rakenteen sauvoista ja liitoksista ja näiden sisäiset rasitukset kuormitustapauksittain. Mitoituksen kannalta oleelliset geometriset mitat määritetään suunnitteluohjelmassa. Mitoitusohjelma palauttaa käyttöasteet, kapasiteetit ja kaikki laskennan välitulokset erillisessä tietorakenteessa.

Mitoitusohjelma toteutettiin Matlab –kielellä ja käännettiin Matlab compiler –ohjelmistolla itsenäiseksi kirjastoksi eli .dll -tiedostoksi. Matlab valittiin ohjelmointikieleksi, koska se on insinöörien keskuudessa laajalti tunnettu. Uuden ohjelman tavoitteena on, että mahdollisimman moni ymmärtäisi koodia ja pystyisi muokkaamaan sitä tarpeen vaatiessa. Tähän liittyen ohjelmakoodista generoidaan automaattisesti yksityiskohtainen dokumentaatio Matlab –Publisher –toiminnallisuudella.

Koska suunnitteluohjelma ei ole vielä edistynyt niin pitkälle, että mitoitusohjelma voitaisiin liittää tähän, suoritettiin mitoitusohjelman verifiointi itsenäisesti. Verifiointinissa käytettiin esimerkikiristikkoa, jonka staattinen ratkaisu suoritettiin Pekko Kuulan kandidaatin työnään kehittämällä tasopalkki FEM –ohjelmalla (5). Ohjelma pyörii Mathcad –ohjelman päällä. Tässä on mahdollisuus käyttää rakenteen sisäisiä niveliä ja rotaatiojousia. Esimerkkilaskennassa käytettiin erilaisia rakennemalleja ja tuloksia verrattiin WoDe:een.

## 1.3 Diplomityössä käytetyt suunnitteluohjeet

Mitoitusohjelman pohjana käytettiin Eurocode 5 –standardia (6) sauvojen poikkileikkauksen ja näiden välisten kontaktien mitoittamiseen. Tätä tukemassa oli Suomen Rakennusinsinöörien liiton toimittama puurakenteiden suunnitteluohje RIL 205-1-2009 (7). Tämän suunnitteluohjeen tarkoitus on esittää EC5:n asiat käyttäjäystävällisessä, mutta tiiviissä muodossa (7 s. 3).

Liitosten mitoitus perustuu Inspecta Sertifiointi OY:n toimittamaan ja TkT Ari Kevarinmäen laatimaan Naulalevyrakenteiden suunnitteluohjeeseen (1). Jatkossa suunnitteluohjeeseen viitataan NR -ohjeena tai suunnitteluohjeena.

## **1.4 Kirjallisuutta puumitoituksesta**

Puurakenteen EC5:n pohjautuvasta mitoituksesta on tehty paljon kirjallisuutta. Mainittakoon näistä Porteus & Kermani: Structural Timber Design to Eurocode 5 (8) ja Puurakenteet: STEP1 (9). Jälkimmäinen perustuu EC5:n esinormiin, joten sitä ei voida soveltaa sellaisenaan. Siitä kuitenkin löytyy hyvä periaatetason selostus puun käyttäytymisestä ja normin kaavojen taustalla olevista ilmiöistä.

## **1.5 Naulalevyrakenteista tehtyä tutkimusta**

Naulalevyliitoksen käyttäytyminen on epälineaarista, eikä liitoksen mallintaminen ole yksinkertainen tehtävä. Pekka Kauranen on tutkinut kokeellisesti naulalevyliitoksen jäykkyyttä eri naulalevyillä ja eri kuormitus suunnilla diplomityössään Selvitys Naulalevyliitoksen Jäykkyydestä (10).

Ari Kevarinmäki on tutkinut naulalevyliitoksen pettämistä ja naulalevyrakenteen mekaanista käyttäytymistä väitöskirjassaan Semi-Rigid Behaviour Of Nailplate Joints (11). Kevarinmäki on tutkinut yksittäisen naulalevyliitoksen toimintaa ja johtanut tälle numeerisen laskentamallin julkaisussa Naulalevyliitoksen Toiminta Osa 1: Naulalevyliitoksen Toiminta (12).

Mika Leivo on tutkinut kuormitusajan ja kosteuden vaikutusta naulalevyrakenteen siirtymiin väitöskirjassaan On The Stiffness Changes In Nail Plate Trusses (13). Väitöskirjassa on myös tutkittu muuttuvan kosteuden vaikutusta taipumiin pitkällä aikavälillä.

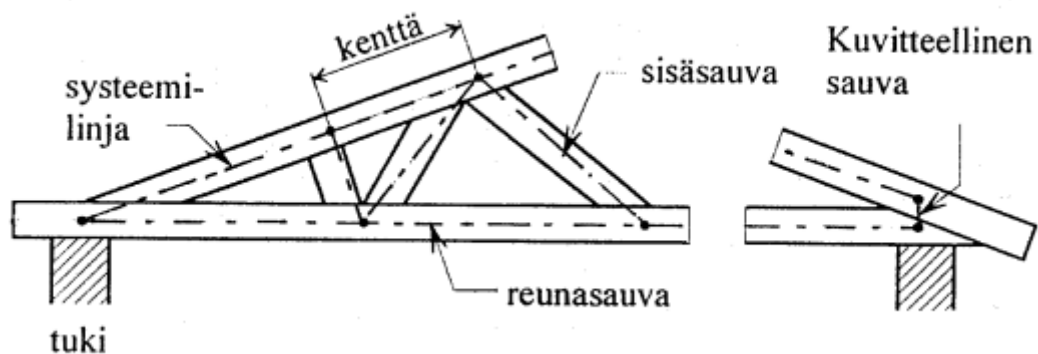
Tuomo Poutanen on esittänyt väitöskirjassaan Analysis of Timber Nail Plate Components (14) lineaarisen menetelmän naulalevyliitoksen mitoitukseen. Poutanen suosittelee, että naulalevy mitoitetaan lineaarisen kimmoteorian mukaan, kun nykyiset suunnitteluohjeet vaativat plastista mitoitusta. Väitöskirjassa esitetty elementtimalli kuitenkin muistuttaa merkittävästi nykyisessä suunnitteluohjeessa esitettyä.

## 2 LASKENTAMALLI

Suunnitteluohje tarjoaa kolme erilaista laskentamallia naulalevyrakenteiden analysointiin. Yksinkertaisimmassa mallissa uumasauvat liittyvät nivelellisesti jatkuvina palkkeina mallinnettuihin paarteisiin. Yleisessä mallissa käytetään jäykkiä palkkielementtejä mallintamaan liitosten epäkeskisyyksiä. Tarkennetussa rakennemallissa liitosten muodonmuutokset huomioidaan käyttämällä liitoksen sisäisiä jäykkyyksiä kuvaavia jousia. Mitoitusohjelma suunniteltiin tarkinta rakennemallia silmälläpitäen. Esimerkkilaskennassa kokeiltiin kaikkia kolmea rakennemallia.

### 2.1 Yksinkertainen rakennemalli

Paarteet mallinnetaan jatkuvina palkkeina. Uumasauvat liittyvät näihin nivelellisesti. Liitosepäkeskisyyksiä ei huomioida eikä uumasauvojen elementtien tarvitse yhtyä sauvojen keskilinjoihin. Tällöin elementin ja uumasauvan keskilinjan välisestä erosta aiheutuva momentti täytyy huomioida sauva mitoittaessa. Suunnitteluohjeen esimerkki yksinkertaisesta rakennemallista on esitetty kuvassa 2.1.



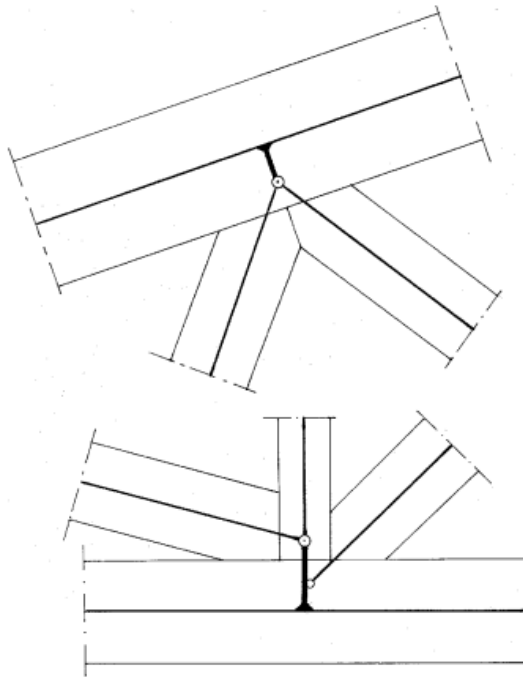
**Kuva 2.1:** Yksinkertainen rakennemalli (1 s. 34). Kuvassa uumasauvoja kutsutaan sisäsauvoiksi ja paarteita reunasauvoiksi.

### 2.2 Yleinen rakennemalli

Uumasauvojen päiden ja paarteiden välille sijoitetaan jäykät palkkielementit, joilla liitosepäkeskisyydet otetaan huomioon. Tällöin uumasauvojen elementit yhtenevät uumasauvojen keskilinjaan. Esimerkkilaskennassa epäkeskisyyksillä oli merkittävä vaikutus paarteiden taivutusmomenttikuvioiden muotoon. Jäykkä palkkielementti toteutetaan asettamalla tämän veto- ja taivutusjäykkyydet hyvin suuriksi rakenteen muihin rakennesiini verrattuna, esimerkiksi 1000 –kertaisiksi.

Yleistä ja yksinkertaista rakennemallia voidaan käyttää yksinkertaisten kolmiomaisten harjaristikoiden mallintamiseen. Paarteiden rajaamassa kuviossa ei saa olla sisäänpäin kääntyviä kulmia. Lisäksi ristikon korkeuden tulee olla suurempi kuin 0,15 kertaa jänneväli (tukien etäisyys) ja paarteen poikkileikkauksen suurin korkeus 10 - kertainena. Tukien tulee sijaita vähintään tietyllä etäisyydellä alapaarteen päistä. Eurocode 5 ja suunnitteluohje eivät määrittele sitä, milloin tulisi käyttää yleistä ja milloin yksinkertaisinta rakennemallia.

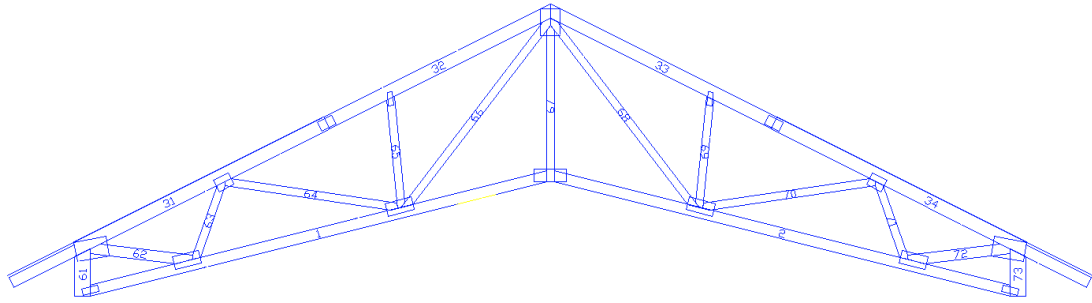
Yksinkertaisella ja yleisellä rakennemallilla ristikko voidaan analysoida naulalevyistä riippumatta. Suunnitteluohjeen esimerkki epäkeskisyyksien mallintamisesta on annettu kuvassa 2.2



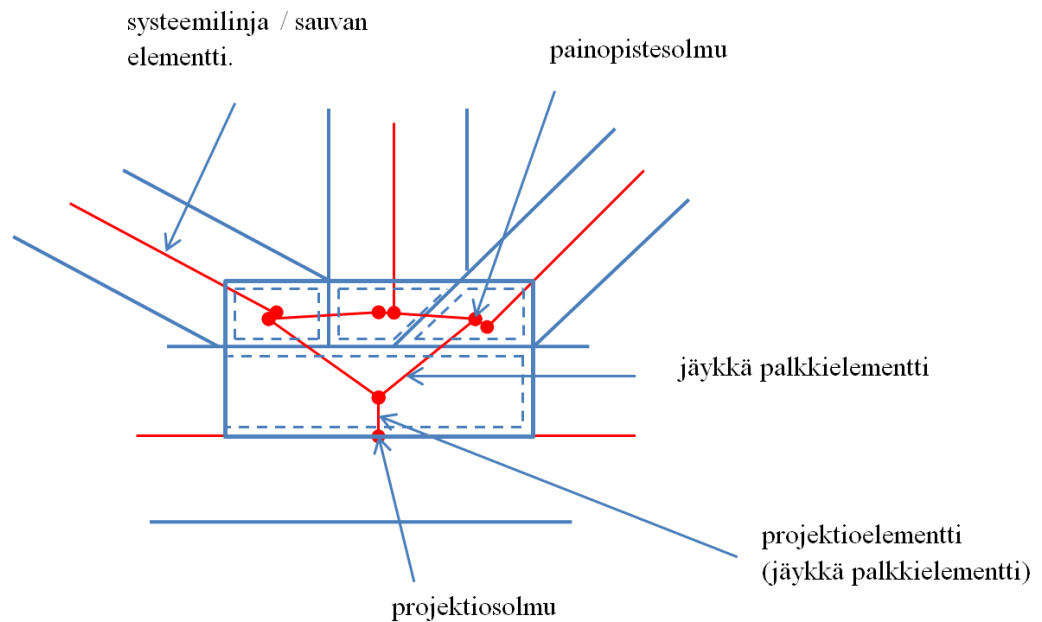
**Kuva 2.2:** Yleisen rakennemallin mukaisia liitoksia (1 s. 35).

## 2.3 Tarkennettu rakennemalli

Mikäli ristikossa on sisäänpäin kääntyviä kulmia, kuten esimerkiksi kuvan 2.3 saksiristikossa, tai rakenne ei täytä edellä mainittuja vaatimuksia, tulee liitosten muodonmuutokset huomioida. Liitoksen tarkennettu rakennemalli on esitetty kuvassa 2.4.



**Kuva 2.3: Saksiristikko.**



**Kuva 2.4: Liitosalueen tarkennettu rakennemalli.**

Kuvan painopistesolmut sijaitsevat tartunta-alojen pintakeskiöissä. Nämä yhdistetään sauvojen elementteihin kohtisuorilla projektioelementeillä. Jokaiseen painopistesolmuun sijoitetaan kolme joustia.

- 1) Sauvan suuntainen jousi, jonka jäykkyys on  $k_N$
- 2) Sauvalle kohtisuora jousi,  $k_V$
- 3) Rotaatiojousi,  $k_r$

Jousien jäykkyyttä varten tulee määrittää naulalevyn keskimääräinen siirtymäkerroin  $K_{F,\alpha} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^3} \right]$ . Kerroin kuvaa naulalevyn ja puun välisen tartunnan jäykkyyttä pinta-ala yksikköä kohden. Jäykkyys riippuu kuormitussuunnasta. Kulma  $\alpha$  on kuormituksen ja naulalevyn pääakselin (yleensä pituussuuntainen akseli) välinen kulma. Pääakseli on yleensä naulalevyn pituuden suuntainen akseli. Naulalevyn koordinaatisto on esitetty

luvussa 3.2. Kaavat siirtymäkertoimien laskentaan esitetään kullekin naulalevytyypille ominaisessa naulalevylausunnossa, ja nämä voivat siis vaihdella naulalevystä toiseen.

Naulalevylausunto on naulalevyn mekaanisia ominaisuuksia kuvaava dokumentti, jonka naulalevyvalmistaja tilaa joltakin näiden myöntämiseen oikeutetulta laitokselta, esimerkiksi VTT:ltä. Dokumentti vaaditaan, ennen kuin naulalevyä voidaan käyttää rakenteissa.

Jousien jäykkyydet lasketaan kaavoilla

$$k_N = 2A_{ef} \cdot K_{F,\alpha}, \quad (2.1)$$

$$k_V = 2A_{ef} \cdot K_{F,\alpha-90^\circ} \quad (2.2)$$

ja

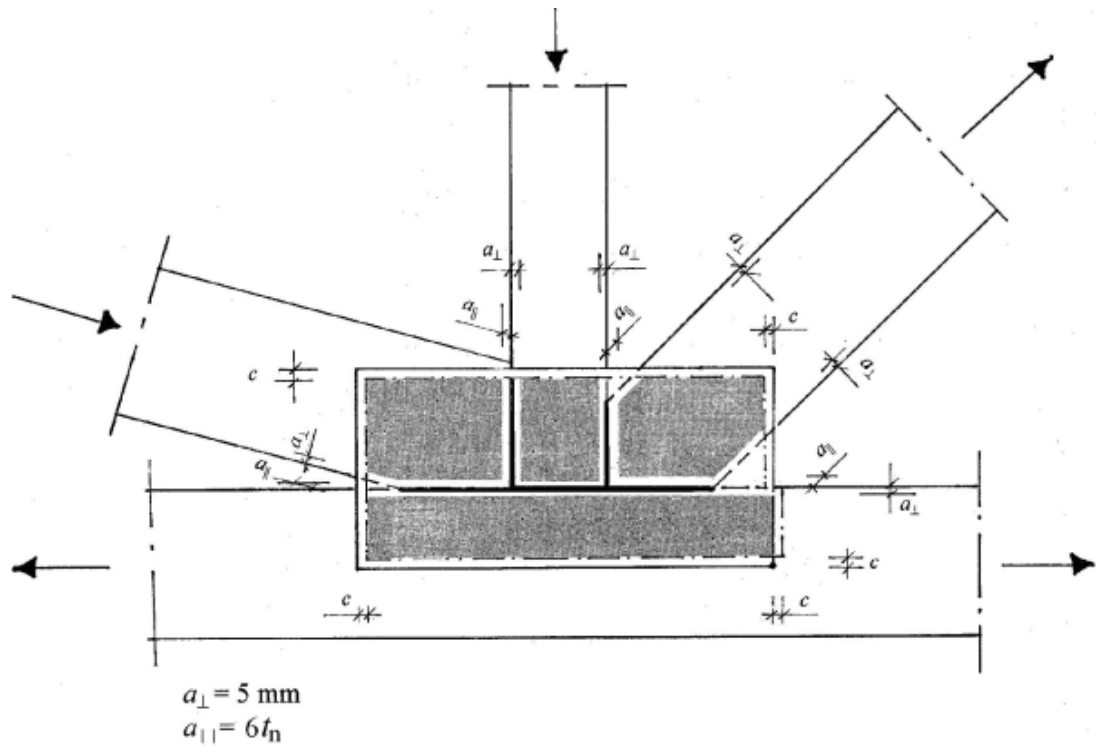
$$k_R = 2I_p \cdot K_{F,ser}, \quad (2.3)$$

joissa  $A_{ef}$  on liittyvän sauvan efektiivinen tartuntapinta-ala,  $\alpha$  naulalevyyn liittyvän sauvan ja naulalevyn pääakselin välinen kulma,  $K_{F,ser}$  eri kuormitussuuntien keskiarvona laskettu keskimääräinen siirtymäkerroin ja  $I_p$  tartunta-alan polaarinen jäyhyysmomentti.

Murtorajatilassa, eli ristikon lujuutta tarkasteltaessa jäykkyyksiä redusoidaan kertoimella 2/3. Käyttörajatilassa, eli maksimi siirtymiä tarkasteltaessa käytetään edellä mainittuja arvoja. Tässä työssä keskitytään yksinomaan murtorajatilan tarkasteluun.

## 2.4 Efektiivinen tartunta pinta-ala

Tartuntapinta-ala  $A_{ef}$  kuvaa naulalevyn ja siihen liittyvän sauvan välistä tartuntavoimaa välittävää aktiivista pinta-alaa. Tartunta-ala on naulalevyn ja puun yhteinen pinta-ala, josta on vähennetty puun reunavähennykset ja naulalevyjen sijoituksen epätarkkuudesta johtuvat vähennykset. Nämä vähennykset on esitetty kuvassa 2.5.



**Kuva 2.5: Tartunta-aloista tehtävät reunavähennykset (1 s. 8).**

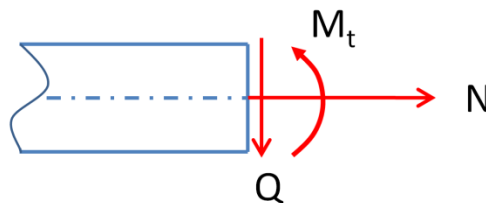
Kuvassa esiintyvä mitta  $c$  –on naulalevyn sijoitustoleranssi. Käytännössä myös naulalevyn kulma voi muuttua. Sijoitustoleranssi on yleensä 5-7mm luokkaa. Tässä työssä tartunta-aloja kuvataan katkoviivakuvioilla.

### 3 MITOITUKSEN YLEISET PERIAATTEET

#### 3.1 Mitoituksessa tarkistettavat asiat

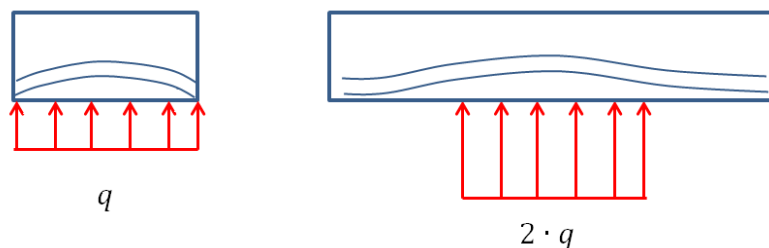
Kuten johdannossa mainittiin, mitoitus koostuu Eurocode 5:n mukaisesta puumitoituksesta ja naulalevyrakenteiden suunnitteluohjeen mukaisesta liitosmitoituksesta. suunnitteluohje tuo joitain lisäyksiä puumitoitukseen. Mitoituksessa tarkistettavat asiat selityksineen on listattu seuraavassa. Kutakin asiaa käsitellään syvällisemmin näihin liittyvissä aliluvuissa.

*EC5: Puun poikkileikkaus:* Puusauva mitoitetaan normaalivoimalle, taivutukselle ja leikkaukselle kuvan 3.1 mukaisesti.



**Kuva 3.1: Sauvan poikkileikkauksen voimasuureet tasotapauksessa.**

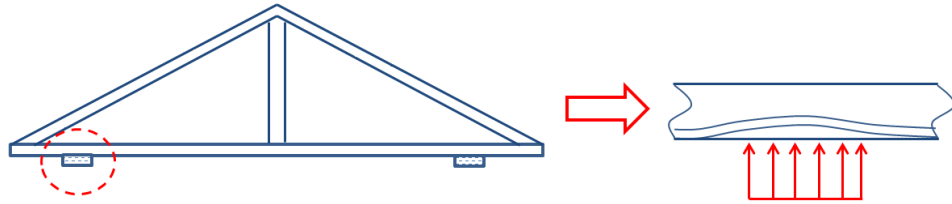
*EC5: Leimapaine ja kiskopaineerotukset:* Syitä vastaan kohtisuoran puristuksen kapasiteetin laskennassa voiman vaikutuspinta-alana voidaan käyttää todellista puristettua aluetta ympäröivää aluetta, jolloin kapasiteetti kasvaa kuvan 3.2 mukaisesti.



**Kuva 3.2: Leimapaine ja kiskopaineerotukset.**

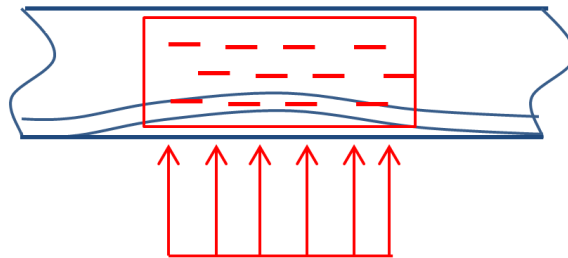


*EC5: Tukipaine:* Puun rakenteellinen tuki mitoitetaan leimapaineen mukaisesti. Rakenteellinen tuki on esitetty kuvassa 3.3.



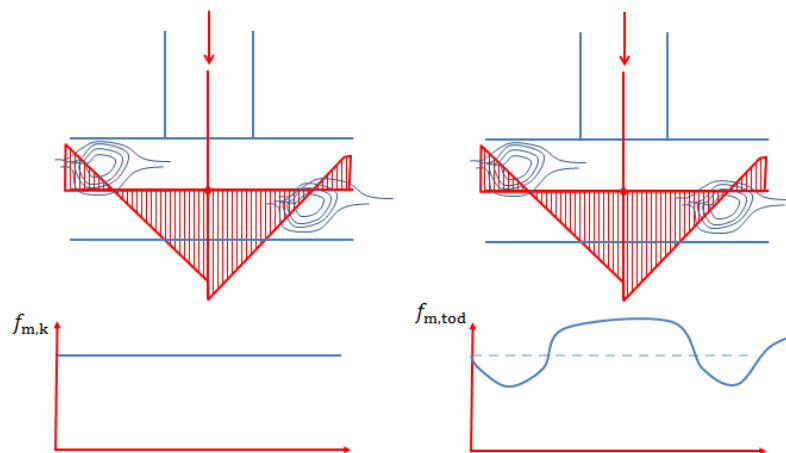
**Kuva 3.3: Tukipaine.**

*NR: Tukialueen naulalevyvahvistus:* Rakenteellisen tuen kapasiteettia voidaan kasvattaa lisäämällä naulalevyt sauvaan tukialueen kohdalle, kuten kuvassa 3.4 on esitetty.



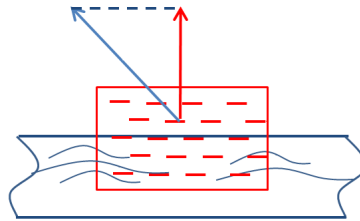
**Kuva 3.4 Tukialueen naulalevyvahvistus.**

*NR: Taivutuslujuuden korotus solmupisteen kohdalla:* Puusauvan lujuus ilmoitetaan aina sen heikoimman kohdan mukaan. Pienellä alueella puun lujuus on todennäköisesti tätä suurempi. Tämän vuoksi puun taivutuslujuutta voidaan korottaa terävän momentti-huipun kohdalla kuvan 3.5 mukaisesti.



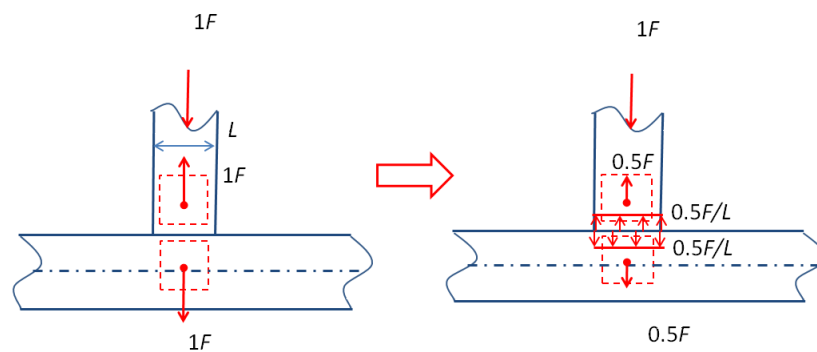
**Kuva 3.5: Taivutuslujuuden korotus.**

*NR: Paarteen halkeaminen liitoksessa:* Naulalevystä kohdistuu puuhun syitä vastaan kohtisuora vetokomponentti. Tämä on havainnollistettu kuvassa 3.6.



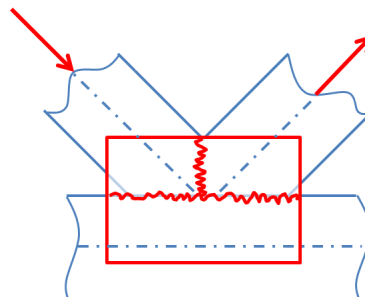
**Kuva 3.6: Paarteen halkeaminen.**

*NR: Puukontaktit:* Naulalevyihin kohdistuvia voimia voidaan pienentää hyödyntämällä puusauvojen välistä puristusta, kuten kuvassa 3.7 on esitetty.



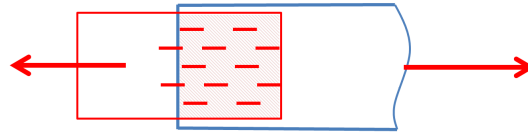
**Kuva 3.7: Puukontaktit liitoksessa. Kuvan voimat vaikuttavat puuhun.**

*NR: Levylujuus:* Tarkistetaan naulalevyn repeytyminen sauvojen välisissä saumoissa. Saumat on esitetty kuvassa 3.8.



**Kuva 3.8: Naulalevyn repeytyminen saumakohdissa.**

*NR: Tartunta:* Mitoitetaan naulalevypiikkien tarttuminen puuhun kuvan 3.9 mukaisesti.



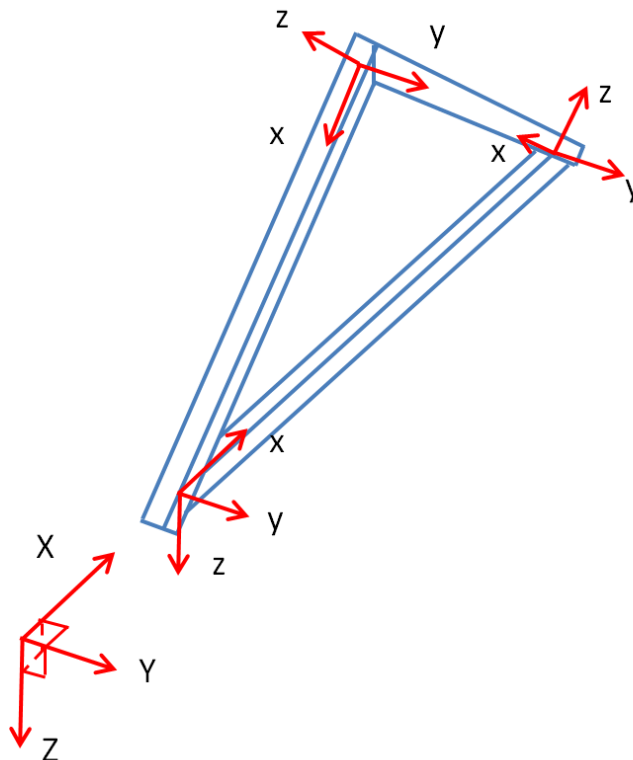
**Kuva 3.9: Naulalevypiikkien tartunta.**

### 3.2 Voimat ja koordinaatistot

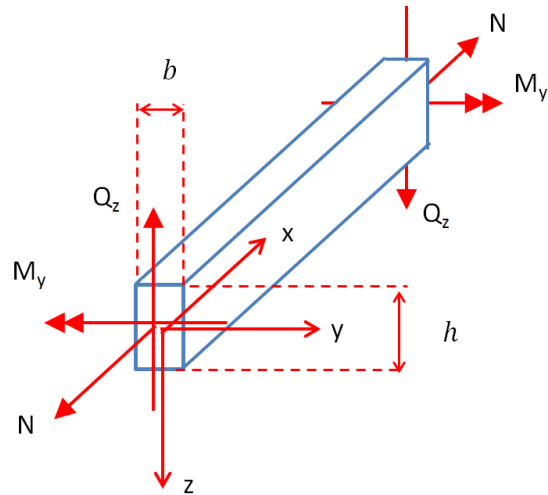
Koordinaatistojen valinnan suhteen pyrittiin noudattamaan ensisijaisesti suunnitteluohjetta ja sen jälkeen EC5:ä.

Rakenteen koordinaatisto ja sauvojen paikalliset koordinaatistot on esitetty kuvassa 3.10. Ohjelmoinnin kannalta on hyvin tärkeää, että sauvojen lokaali y-akseli osoittaa aina samaan suuntaan. Rakenteen koordinaatiston origolla ei ole merkitystä mitoituksen kannalta.

Yksittäisen sauvan lokaali koordinaatisto ja tasotapauksen voimasuureet on esitetty kuvassa 3.11. Valittu koordinaatisto perustuu RIL-1-2009:n kuvaan 6.1 (7 s. 65).



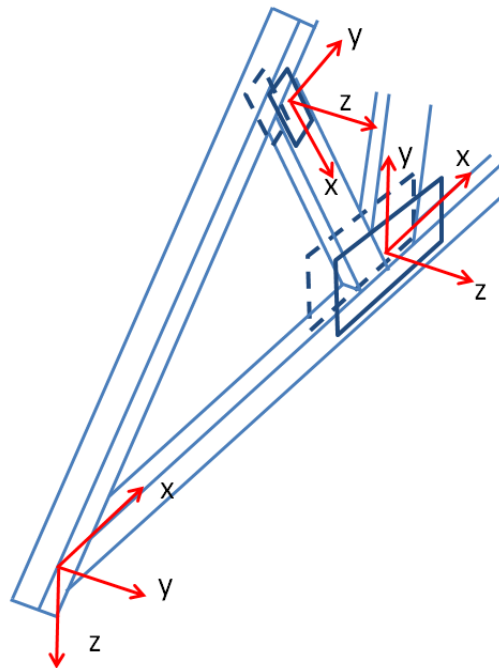
**Kuva 3.10: Rakenteen koordinaatisto ja sauvojen paikalliset koordinaatistot.**



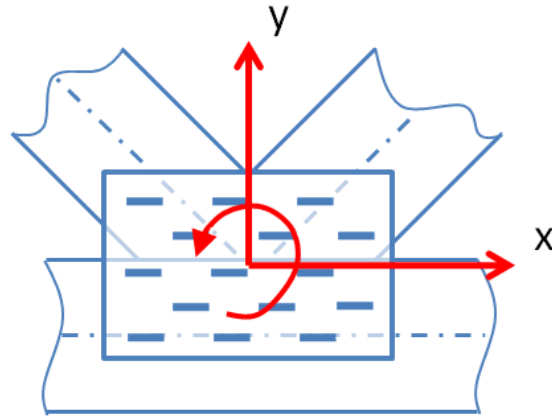
**Kuva 3.11: Sauvan paikallinen koordinaatisto ja tasotapauksen voimasuureet.**

Liitosten koordinaatistot ristikkoon nähden on esitetty kuvassa 3.12. Huomaa, että liitoksen lokaali  $z$ -akseli yhtyy rakenteen koordinaatiston  $Y$ -akseliin.

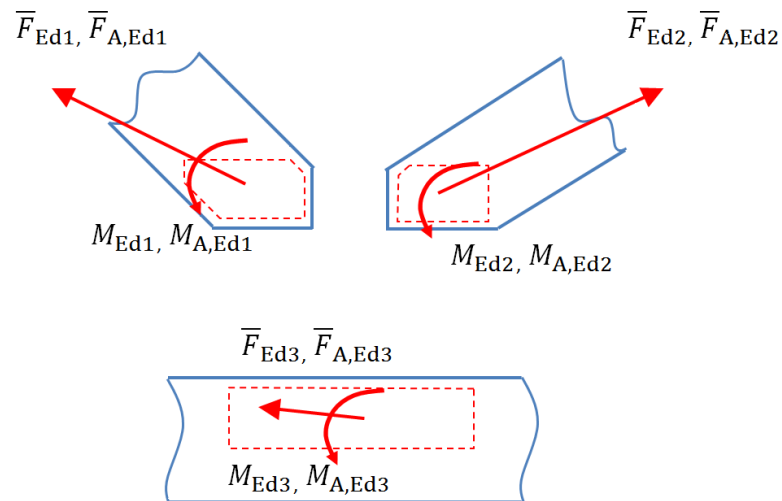
Yksittäisen liitoksen koordinaatisto ja positiivinen kiertosuunta on esitetty kuvassa 3.13. Koordinaatiston  $x$ -akseli on naulalevyn pääakselin suuntainen, ja origo sijaitsee naulalevyn keskipisteessä. Liitoksen välittämät voimat ja momentit on esitetty kuvassa 3.14.



**Kuva 3.12 Liitosten lokaalit koordinaatistot ristikossa.**



**Kuva 3.13 Liitoksen koordinaatisto ja positiivinen kiertosuunta / momentti.**



**Kuva 3.14: Liitosvoimat ja -momentit.**

Liitosvoimavektoreiden  $\bar{F}_{Ed}$  ja -momenttien  $M_{Ed}$  positiivinen suunta määritellään niin, että ne kohdistuvat puuhun. Kuvassa esiintyvät  $\bar{F}_{A,Ed}$  ja  $M_{A,Ed}$  tarkoittavat sauvojen välisillä puristuskontakteilla redusoituja liitosvoimia, toisin sanoen naulalevyjen välittämiä voimia. A = Anchorage = tartunta.

## 4 EUROCODE 5:N MUKAINEN PUUMITOITUS

### 4.1 Yleistä

Teräkseen verrattuna puu on anisotrooppinen ja epähomogeeninen materiaali. Puusauvan paikallinen lujuus voi vaihdella merkittävästi esimerkiksi oksankohdista johtuen. Lisäksi käytetty puulajike vaikuttaa lujuuteen. Puun lujuuden hajonta on suurempi kuin teräksellä, minkä vuoksi materiaalin osavarmuusluvut ovat huomattavasti suuremmat. Kattoristikoissa puun materiaaliosavarmuusluku on yleensä 1,4, kun taas naulalevyteräksen varmuus on vain 1,1.

Jotta suunnittelu olisi helpompaa, on puulle kehitetty niin kutsutut lujuusluokat. Sahalta tuleva sahatavara lujuuslajitellaan joko silmämääräisesti epäsäännöllisyyksien mukaan, tai koneellisesti kimmomodulia mittaamalla. Lujuusluokka lupaa puusauvalle tietyt lujuusarvot. Tällöin suunnittelussa voidaan valita rakenteeseen tietyn lujuusluokan puutavaraa, mutta suunnittelijan ei tarvitse ottaa kantaa esimerkiksi puulajikkeeseen. Yleiset ohjeet lujuuslajitteluun on annettu standardissa EN 14081-1 (15). Sahatavaran lujuusluokat on annettu standardissa EN 338:2009 (16). Sahatavaran lujuusluokat materiaaliarvoineen on esitetty taulukossa 4.1. Materiaaliarvojen merkitykset on avattu taulukossa 4.2.

**Taulukko 4.1: Sahatavaran lujuusluokat materiaaliarvoineen (7 s. 47) ja (16 s. 7).**

Lujuusluokka	-	C14	C18	C24	C30	C35	C40
$\rho_k$	kg/m <sup>3</sup>	290	320	350	380	400	420
$f_{c,0k}$	MPa	16	18	21	23	25	26
$f_{c,90k}$	MPa	2	2	3	3	3	3
$f_{t,0k}$	MPa	8	11	14	18	21	24
$f_{t,90k}$	MPa	0	1	1	1	1	1
$f_{v,k}$	MPa	2	2	3	3	3	4
$f_{m,k}$	MPa	14	18	24	30	35	40
$\gamma_M$	MPa	1,40	1,40	1,40	1,25	1,25	1,25
$E_{0,mean}$	MPa	7 000	9 000	11 000	12 000	13 000	14 000
$E_{0,05}$	MPa	4 700	6 000	7 400	8 000	8 700	9 400
$G_{mean}$	MPa	440	560	690	750	810	880
$G_{0,05}$	MPa	300	380	460	500	540	590
$\beta_c$	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

**Taulukko 4.2: Materiaaliarvojen selitykset.**

$\rho_k$	Puun tiheyden ominaisarvo.
$f_{c,0k}$	Syiden suuntaisen puristuksen ominaislujuus.
$f_{c,90k}$	Syihin nähden kohtisuora puristuslujuus.
$f_{t,0k}$	Syiden suuntainen vetolujuus.
$f_{t,90k}$	Syihin nähden kohtisuora vetolujuus
$f_{v,k}$	Leikkauslujuus
$f_{m,k}$	Taivutuslujuus
$\gamma_M$	Varmuusluku
$E_{0,mean}$	Keskimääräinen syiden suuntainen kimmomoduli.
$E_{0,05}$	Syiden suuntaisen kimmomodulin 5% fraktiili.
$G_{mean}$	Keskimääräinen liukumoduli.
$G_{0,05}$	Liukumodulin 5% fraktiili.
$\beta_c$	Puun alkukäyryydestä riippuva kerroin. Käytetään stabiiliustarkastelussa.

Kuten taulukoista nähdään, puulla on eri lujuudet normaalivoimalle ja taivutukselle. Lisäksi puulla on lujuutta lähinnä syiden suunnassa. Syille kohtisuorat lujuusarvot ovat vain murto-osan näistä.

Taulukossa esiintyvät lujuusarvot ovat ominaisarvoja tai ns. karakteristisia arvoja. Lujuuden karakteristisena arvona käytetään lujuuden 5% fraktiilia, eli 5% puutavarasta alittaa tämän lujuuden. Ominaisarvojen määrittäminen koetuloksista ohjeistetaan standardissa EN 14358:2006 (E) (17).

Puun lujuus riippuu myös ympäristön kosteudesta ja kuormituksen kestosta. Lujuuden suunnitteluarvo lasketaan kaavalla

$$f_d = k_{mod} \frac{f_k}{\gamma_M}, \quad (4.1)$$

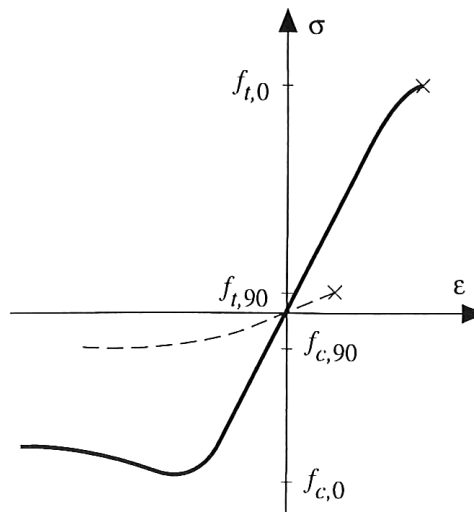
jossa  $k_{mod}$  on ympäristön kosteudesta (käyttöluokasta) ja kuormituksen kestosta (aika-luokasta) riippuva kerroin,  $f_k$  halutun lujuuden ominaisarvo ja  $\gamma_M$  valitun puumateriaalin varmuusluku. Kuten taulukosta 4.1 havaitaan, on varmuusluku suuremmilla lujuusluokilla pienempi. Tämä johtuu siitä, että suuremman lujuusluokan sauvoissa on vähemmän häiriöitä, jolloin ominaislujuuden alitukset ovat pienempiä. Muunnoskertoimen  $k_{mod}$  -kertoimen arvot on esitetty taulukossa 4.3.

**Taulukko 4.3: Kuorman keston ja kosteusvaikutuksen muunnoskerroimen  $k_{mod}$  arvot.**

Käyttöluokka	Aikaluokka				
	Pysyvä	Pitkä	Keskipitkä	Lyhyt	Hetkellinen
1	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
2	0,6	0,7	0,8	0,9	1,1
3	0,5	0,55	0,65	0,7	0,9

Suuremmat käyttöluokat tarkoittavat suurempia kosteusolosuhteita. Tällöin riski puun lahoamiselle on korkeampi. (9 s. A14/2)

Puu ei käyttäydy täysin lineaarikimmoisesti. virheettömän puun jännitysvenymäkäyrä on esitetty kuvassa 4.1. Kuvassa vetolujuus on suurempi kuin puristuslujuus, kun taas taulukossa 4.1 puristuslujuus on suurempi. Reaalimaailman puusauvassa olevat virheet heikentävät vetolujuutta huomattavasti enemmän kuin puristuslujuutta – lähteen (8 s. 4) mukaan puussa oleva oksankohta on irrallaan ympäröivästä puusta. Tästä voidaan päätellä, ettei oksankohta kestä juurikaan vetoa, mutta kantaa puristusta kontaktin kautta. Kuvasta nähdään myös, että vetopuolella puun murtuminen on haurasta, kun taas puristuspuolella sitkeää.



**Kuva 4.1: Virheettömän puun jännitysvenymäkäyrä (9 s. B2/2).**

## 4.2 Komposiittipalkit

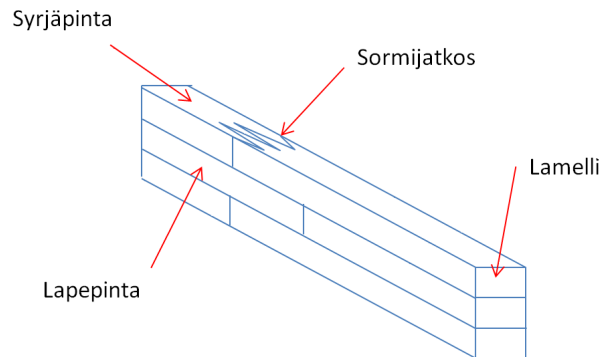
Sahatavara valmistetaan sahaamalla puun rungosta sauvoja. Normaalin sahatavaran ongelmana on puun epäsäännöllisyyksien, kuten oksankoitien vaikutus lujuuteen. Tällöin koko sauvan lujuutena joudutaan käyttämään sitä kohtaa, jossa poikkileikkaus on heikoimmillaan. Tätä paikkaamaan on kehitetty komposiittipalkkeja.

Liimapuu valmistetaan liimaamalla päällekkäin sahatavaran kappaleita - lamelleja. Näitä kappaleita voidaan pidentää sormijatkoksilla. Liimapuussa palkin reu-

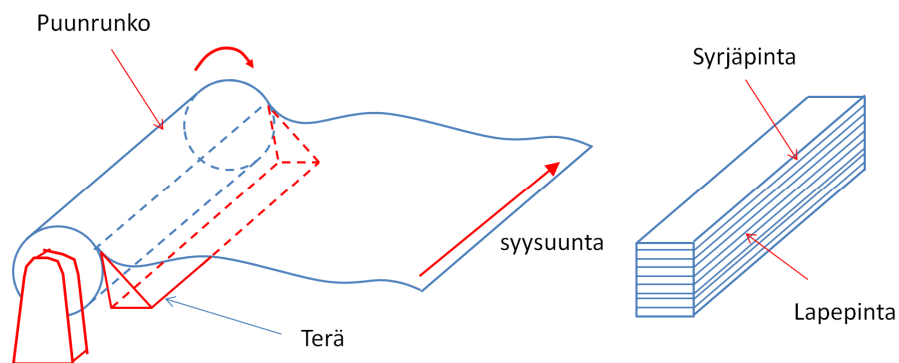


noille voidaan valita suuremman lujuusluokan lamelleja, jolloin puun taivutuslujuus saadaan korkeammaksi. Liimapuun periaate on esitetty kuvassa 4.2.

LVL (Lamel Veneered Lumber) valmistetaan leikkaamalla puusta ohuita viiluja, joita liimataan päällekkäin. Tällä tavoin puusta voidaan valmistaa myös levyjä. Lamelli- en valmistusprosessi ja LVL-sauvan rakenne on esitetty kuvassa 4.3.



**Kuva 4.2: Liimapuupalkin rakenne.**



**Kuva 4.3: Viilujen valmistus ja LVL -palkin rakenne.**

Kun palkki koostuu useasta lamellista, on epätodennäköistä, että jokaisessa lamellissa olisi häiriö (oksa) samassa kohdassa. Tällöin puun lujuudelle tulee pienempi hajonta. Liimapuun ja LVL:n osavarmuusluku onkin 1,2, verrattuna sahatavaran 1,4:n. Puu käyristyy iän myötä. Komposiittipalkeissa eri lamellit käyristyvät eri suuntaan, jolloin nämä osittain kumoavat toisensa. LVL:llä ja liimapuulla alkukäyryys –kerroin  $\beta_c$  rakenneta-son suuntaiselle nurjahdukselle onkin 0,1, verrattuna sahatavaran 0,2:een. Kohtisuoralle nurjahdukselle kerroin on sama.

Laskentaohjelmaan kehitettiin valmius lisätä laskenta liimapuulle ja LVL:lle. Tämä työ rajataan kuitenkin ainoastaan tavallisen sahatavaran mitoituseseen. Käytännös- sä myös LVL:ää ja liimapuuta käytetään naulalevyristikoissa, joten nämä toteutetaan mitoitusohjelmaan myöhemmin.

### 4.3 Puusauvan poikkileikkauksen mitoitus

Sauvan materiaalin lisäksi myös poikkileikkauksen ulkomitat vaikuttavat sallittuihin jännityksiin. Sauvan stabiilius tarkistetaan poikkileikkauksen mitoituksen yhteydessä mitoitusohjelman ulkopuolella laskettujen nurjahdus- ja kiepahduspituuksien perusteella.

Tässä tarkastellaan puun syysuunnalle kohtisuoria normaalijännityksiä ja leikkausvoiman aiheuttamaa syihin nähden kohtisuoraa leikkausta. Normaalijännitykset määritetään voima- ja momenttikuvioista palkkien teknisen taivutusteorian mukaisesti.

Naulalevyristikot ovat tasomaisia rakenteita. Mitoitusohjelman kehityksessä otettiin huomioon mahdollisuus lisätä toiminnallisuus avaruussauvan mitoitukselle. Siksi tässäkin esitetään osittain avaruustapauksen kaavat. Leikkausjännityksen laskennassa huomioidaan ainoastaan tasotapauksen leikkausvoima  $Q_z$ . Vääntöä ei käsitellä.

#### 4.3.1 Veto- ja taivutuslujuuden korotus

Vedetty puusauva murtuu hauraasti. Tällöin voidaan soveltaa heikoimman lenkin teori-aa – sauva murtuu, kun sen heikoin kohta murtuu. Todennäköisyyslaskennalla voidaan osoittaa, että kappaleen koon kasvaessa kasvaa myös todennäköisyys, että jokin kohta kappaleesta murtuu. (9 ss. B1/1 - B1/5). Vastaavasti murtumistodennäköisyys pienenee pienillä kappaleilla. Eurocode 5 huomioi ilmiön korotuskertoimella. Sahatavaran tapauksessa puun veto- ja taivutuslujuutta voidaan korottaa kertoimella

$$k_h = \left( \frac{150\text{mm}}{h} \right)^{0,2} \leq 1,3, \quad (4.2)$$

jossa  $h$  on palkin suurempi sivumitta laskettaessa kerrointa vedolle ja taivutusakselia vastaan kohtisuora mitta laskettaessa kerrointa taivutukselle. Mitoitusohjelma laskee tämän kertoimen kolmeen kertaan  $-k_{h,t}$  vedolle,  $k_{h,m_y}$  taivutukselle y-akselin suhteen ja  $k_{h,m_z}$  taivutukselle z-akselin suhteen.

Liimapuulle pätee samankaltainen kaava, paitsi että taivutuslujuutta ei voida nostaa palkin leveyssuunnassa. LVL:n tapauksessa lujuutta pitää pienentää, jos poikkileikkauksen mitat tai sauvan pituus ylittävät tietyn arvon.

#### 4.3.2 Veto

Vedetyn puusauvan käyttöaste saadaan kaavalla

$$ur_t = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}}, \quad (4.3)$$

jossa  $\sigma_{t,0,d}$  on vetojännityksen ja  $f_{t,0,d}$  on vetolujuuden mitoitusarvo.

### 4.3.3 Puristus

Puristetun stabiilin sauvan käyttöaste lasketaan kaavalla

$$ur_c = \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}, \quad (4.4)$$

jossa esiintyvät suureet ovat analogisia vetotapaukselle.

### 4.3.4 Taivutus

Avaruustapauksessa yhdistetyn taivutuksen käyttöaste lasketaan kaavoilla

$$ur_{m_y} = \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}}, \quad (4.5)$$

$$ur_{m_z} = k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}}, \quad (4.6)$$

$$ur_m = \max \begin{cases} ur_{m_y} \\ ur_{m_z} \end{cases}, \quad (4.7)$$

joissa  $k_m$  on kerroin, jolla huomioidaan se, että palkin kapasiteettia ei ole loppuun käytetty, kun kimmoteorian mukaiset jännitykset ylittävät lujuuden mitoitusarvot nurkassa. Neliöpoikkileikkauksessa kerroin on 0,7 sahatavaralle, liimapuulle ja LVL:lle. muille poikkileikkauksille ja puutypeille kerroin on 1,0.

Kimmoteorian mukaan suurimmat jännitykset tulevat neliöpoikkileikkauksen kulmiin. Kerroin todennäköisesti viittaa siihen, että pienellä alueella, esim. nurkassa puun lujuus on todennäköisesti suurempi kuin ilmoitettu arvo, joka on yleensä 95% fraktiili jaettuna varmuusluvulla. Lisäksi puu ei käyttäydy lineaarikimmoisesti jännityskäyrän äärirajoilla. Tämä johtaa siihen, että nurkissa jännitykset eivät todellisuudessa kohoa niin korkeiksi, kuin lineaarinen palkkiteoria ilmoittaa.

### 4.3.5 Yhdistetty taivutus ja veto

Yhdistetyn taivutuksen ja vedon tapauksessa kummankin rasituksen erikseen lasketut käyttöasteet summataan yhteen.

$$ur_{mt} = ur_t + ur_m. \quad (4.8)$$

kaavassa on sovellettu EC5:n yhtälöitä 6.17 ja 6.18.

### 4.3.6 Yhdistetty taivutus ja puristus

Taivutuksen ja puristuksen tapauksessa puristavan voiman vaikutusta pienennetään. Yhdistetyn rasituksen käyttöaste on

$$ur_{mc} = ur_c^2 + ur_m, \quad (4.9)$$

kun sovelletaan EC5:n yhtälöitä 6.19 ja 6.20. Puristavan voiman pienennetty vaikutus johtunee siitä, että puun puristuskestävyys on suurempi kuin vetokestävyys. Lisäksi puu käyttäytyy puristuspuolella sitkeämmin kuin vetopuolella, kuten kuvasta 4.1 käy ilmi.

### 4.3.7 Stabiilius

Kuten aiemmin mainittiin, sauvojen stabiilius tarkastetaan poikkileikkauksen mitoituksen yhteydessä. Tätä varten sauvalle määritetään nurjahduskertoimet  $k_{c,y}$ ,  $k_{c,z}$  ja kiepahduskerroin  $k_{crit}$ .

Seuraavassa esitetään nurjahduskertoimien määrittäminen. Määrittäminen tapahtuu vain rakennetason suuntaisen nurjahduksen suhteen. Kohtisuoran nurjahduksen kerroin määritetään samalla tavalla. Ensimmäinen määritetään sauvan hoikkuus.

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_y}, \quad (4.10)$$

jossa  $L_{c,z}$  on sauvan nurjahduspituus rakennetason, eli sauvan lokaalin z-akselin suuntaisessa nurjahduksessa, kun taas  $i_y$  on poikkileikkauksen neliösäde y-akselin suhteen. Neliösäde voidaan laskea kaavalla

$$i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}, \quad (4.11)$$

jossa  $I_y$  on poikkileikkauksen neliömomentti ja  $A$  pinta-ala. Tämän jälkeen määritetään sauvan suhteellinen hoikkuus kaavalla

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}}, \quad (4.12)$$

jossa  $f_{c,0,k}$  on puun syiden suuntaisen puristuslujuuden karakteristinen arvo ja  $E_{0,05}$  syiden suuntaisen kimmomodulin 5% fraktiili. EC5 –standardi käyttää nurjahduskertoimen esityksessä välitulosta

$$k_y = \frac{1}{2} (1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2), \quad (4.13)$$

jossa  $\beta_c$  on puun alkukäyryydestä riippuva kerroin, joka on sahatavaralle 0.2. Liima- ja kertopuulla kerroin riippuu taivutusakselin suunnasta. Lopullinen nurjahduskerroin saadaan kaavalla

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 + \lambda_{rel,y}^2}} \leq 1 \quad (4.14)$$

Mikäli molemmat nurjahduskertoimet ovat 1, voidaan sauva mitoittaa aiemmin esitetyn kaavan (3.8 [puristus + taivutus] ) mukaisesti. Muutoin puristuslujuutta redusoidaan nurjahduskertoimilla. Yhdistetyn puristuksen ja taivutuksen käyttöaste lasketaan tällöin kaavoilla

$$ur_{mcy} = \frac{ur_c}{k_y} + ur_{my}, \quad (4.15)$$

$$ur_{mcz} = \frac{ur_c}{k_z} + ur_{mz}, \quad (4.16)$$

joissa lasketuista kahdesta käyttöasteesta valitaan suurempi. Kiepahduksen tarkastelu ja Kiepahduskertoimen laskenta esitetään seuraavassa. Ensin määritetään kriittinen taivutusjännitys kaavalla

$$\sigma_{m,crit} = \frac{M_{y,crit}}{W_y} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_y}}{l_{ef} W_y}, \quad (4.17)$$

jossa  $E_{0,05}$  on liukumodulin 5% fraktiili,  $I_v$  neliömomentti heikomman akselin suhteen,  $I_v$  vääntöneliömomentti,  $l_{ef}$  kiepahduspituus ja  $W_y$  taivutusvastus vahvemman akselin suhteen.

Kiepahduksen yhteydessä vahvempi akseli tarkoittaa akselia, jonka suhteen neliömomentti on suurempi. Normissa tämä akseli on aina Y-akseli –mitoitushjelmassa on kuitenkin mahdollista käyttää sauvoja, joissa lyhyempi sivumitta onkin lokaalin Z-akselin suuntainen. Mitoitusohjelma saa vääntöneliömomentin ja kiepahduspituuden parametreina.

Sauvan suhteellinen hoikkuus kiepahdukselle on

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}, \quad (4.18)$$

jossa  $f_{m,k}$  on sauvan taivutuslujuuden ominaisarvo. Kiepahduskerroin on paloittain määritelty hoikkuuden funktio

$$k_{\text{crit}} = \begin{cases} 1 & \lambda_{\text{rel},m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{\text{rel},m} & 0,75 < \lambda_{\text{rel},m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{\text{rel},m}^2} & 1,4 < \lambda_{\text{rel},m} \end{cases} \quad (4.19)$$

Kiepahdus tarkastetaan sekä puristetulle, että vedetylle sauvalle. Puristetulle sauvalle kiepahdus tarkastetaan kaavalla

$$ur_{c,\text{crit}} = \left( \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{\text{crit}} f_{m,y,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}}. \quad (4.20)$$

Vetotapauksessa normaalivoima jätetään pois.

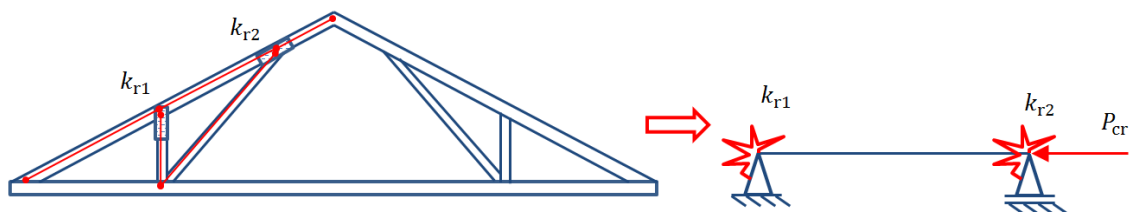
$$ur_{t,\text{crit}} = \left( \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{\text{crit}} f_{m,y,d}} \right)^2. \quad (4.21)$$

EC5 ei yksiselitteisesti kerro, että kiepahdus pitäisi tarkistaa vedetylle sauvalle. NR-Ohjeessa tätä kuitenkin edellytetään ja lisäksi kiepahdusilmiö voi tapahtua myös vedetylle sauvalle (6 ss. 46-47) (1 s. 40).

#### 4.3.8 Nurjahdus- ja kiepahduspituudet

Suunnitteluohjeen mukaan uumasauvoille voidaan käyttää solmupisteiden väliä nurjahduspituutena, mikäli käytetään tarkennettua rakennemallia. Paarteiden rakennetasoa vastaan kohtisuoralle nurjahdukselle nurjahduspituus on poikittainen nurjahdustuentaväli. Tason suuntaiselle nurjahdukselle ehdotetaan virheellisesti kuormituksesta syntyvän taivutusmomenttipinnan nollakohtien väliä. Lineaarisen stabiilisuusteorian mukaan nurjahduspituus kuitenkin on nurjahdusmuodon momenttipinnan nollakohtien väli –suure, joka ei riipu ulkoisesta kuormituksesta.

Vanhassa NR -ohjelmassa on päädytty käyttämään likimääräistä menetelmää, jossa paarteiden nurjahdus käsitellään jännevälikohtaisesti –jokaiselle jännevälille lasketaan oma nurjahduspituus. Menetelmässä jännevälin päihin laitetaan naulalevyjen ja paarteen välisen tartunnan jäykkyyttä vastaavat rotaatiojouset (katso luku 2.3). Nurjahduksessa käytetty laskentamalli on esitetty kuvassa 4.4. Tässä ei oteta kantaa siihen, millaisilla yhtälöillä nurjahduspituus määritettiin.



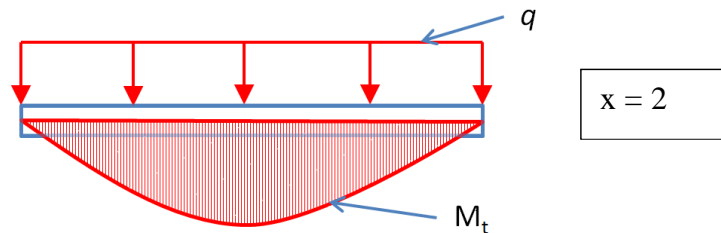
**Kuva 4.4: Paarteen nurjahduspituuden arvioinnissa käytetty laskentamalli.**

Menetelmä ei huomioi jännevälin viereisiltä aukoilta tulevaa jäykkyyttä. Tämän huomioidamalla voitaisiin saada hieman lyhyempi nurjahduspituus. Nurjahduspituuden laskennassa oletetaan, että paarteen normaalivoima pysyy vakiona jännevälin alueella. Todellisuudessa näin ei ole, vaan jännevälin nurjahdus mitoitetaan suurimman puristusvoiman mukaan.

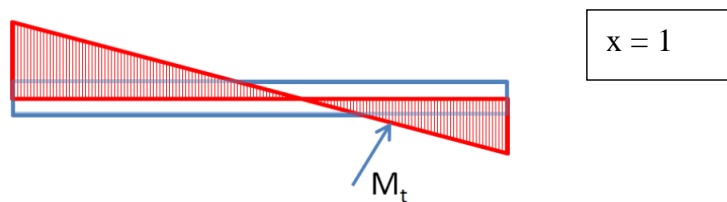
Kiepahduspituuden laskentaan suunnitteluohje antaa kaavan

$$l_{\text{ef}} = \min(a, l_m, L) + x \cdot h, \quad (4.22)$$

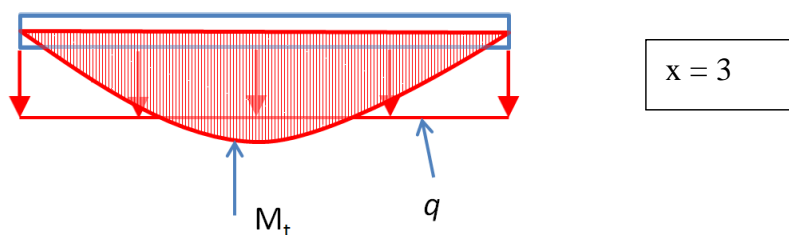
jossa  $a$  on taivutuksen puristaman reunan poikittaistuentaväli –esimerkiksi poikittainen nurjahdustuentaväli,  $l_m$  momenttipinnan nollakohtien väli ja  $L$  päistään tuetun sauvan pituus,  $h$  sauvan poikkileikkauksen korkeus ja  $x$  kerroin, jolla huomioidaan ulkoisen kuorman sijainti. Kertoimen arvo riippuu poikittaisen kuorman sijainnista ja taivutusmomenttipinnan muodosta. Kertoimen arvot on esitetty kuvissa 4.5 – 4.7.



**Kuva 4.5:** Taivutettu sauva, jossa poikittainen kuormitus kohdistuu taivutusmomentin puristamalle sivulle.



**Kuva 4.6:** Taivutettu sauva, jolla ei ole poikittaista kuormaa.



**Kuva 4.7:** Taivutettu sauva, jonka poikittainen kuorma kohdistuu taivutusmomentin vetämälle sivulle.

Kuten aiemmin selostettiin, kuormituksesta aiheutuvan momenttipinnan nollakohtien väliä ei pitäisi käyttää kiepahduspituutena, vaan ratkaistun kiepahdusmuodon momenttipinnan nollakohtien väliä.

#### 4.3.9 Leikkaus

Leikkausjännityksen maksimiarvo lasketaan suorakaidepoikkileikkaukselle palkkiamllin mukaisesti kaavalla

$$\tau_d = \frac{3|Q_z|}{2A_{ef}}, \quad (4.23)$$

jossa  $A_{ef}$  on poikkileikkauksen efektiivinen pinta-ala. Tämä tulee siitä, että käyttöluokassa 1 poikkileikkauksen leveytenä käytetään arvoa

$$b_{ef} = 0,67b. \quad (4.24)$$

Redusointi johtuu siitä, että kuivissa puusauvoissa esiintyy halkeilua, joka heikentää poikkileikkausta. Leikkauksen käyttöaste lasketaan kaavalla

$$ur_v = \frac{\tau_d}{f_{v,d}}. \quad (4.25)$$

EC5 ei anna ohjeistusta siitä, miten leikkausvoimaa pitäisi käsitellä yhdessä muiden rasitusten kanssa. Todennäköisesti tämä johtuu siitä, että leikkausjännitys on suurimmillaan poikkileikkauksen keskellä, kun taas taivutusjännitys saavuttaa huippunsa reunoilla. Normaalivoimasta toki aiheutuu jännitystä myös sauvan keskelle.

### 4.4 Leimapaine ja kiskopaineerotukset

Tässä luvussa käsitellään sauvan syitä vastaan kohtisuoraa puristusta. Ilmiö realisoituu rakenteellisten tukien ja uuma- ja paarisauvojen välisten kontaktien tapauksessa.

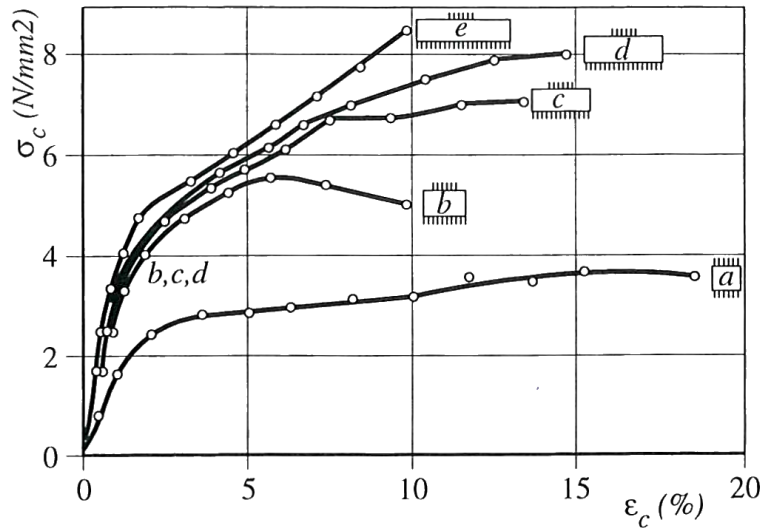
Kuten luvussa 3.1 mainittiin, syitä vastaan kohtisuoran puristuksen tapauksessa puristetun alueen ympärillä olevaa aluetta voidaan käyttää puristuskapasiteetin kasvattamiseksi.

Tämä johtuu siitä, että kohtisuoran puristuksen tapauksessa syyt painuvat kasaan pienten putkiloiden tavoin. Tiettyssä kohtaa putkilot menettävät stabiilisuutensa, jolloin puristusvoimaa ei voida enää lisätä, ja puristuskapasiteetti saavutetaan. Mikäli sauva jatkuu puristetun alueen ympärillä, alkavat puristamattoman alueen syyt kantamaan kuormaa. Tällöin puun kantokyky kasvaa merkittävästi. Tässä tapauksessa puun painuminen valitaan mitoittavaksi tekijäksi –lujuudeksi valitaan jännitys, jolla puu puristuu



kasaan esim. 1-2%. Kohtisuorasti puristetun puun jännitysvenymäkäyrä eri pituisilla kappaleilla on esitetty kuvassa 4.8.

Syitä vastaan kohtisuoraa puristusta kutsutaan leimapaineeksi. Kapasiteetin lisäämistä kutsutaan kiskopaineerotukseksi. Tässä luvussa käsitellään normin ohjeita kiskopaineerotusten laskentaan ja sitä, miten ominaisuus toteutettiin mitoitusohjelmaan. (9 ss. B2/3 - B2/5)



**Kuva 4.8:** Puristetun alueen ympärillä olevan puun vaikutus puristuskapasiteettiin (9 s. B2/4).

#### 4.4.1 Kiskopaineerotus

Suunnitteluohjeessa puun syitä vastaan kohtisuora puristuskapasiteetti lasketaan kaavalla

$$R_{c,90,d} = f_{c,90,d} A k_{c,\perp}, \quad (4.26)$$

jossa  $A$  on puristetun alueen pinta-ala ja  $k_{c,\perp}$  kiskopaineerotusta kuvaava tukipaineekerroin. Viimeksi mainittu lasketaan kaavalla

$$k_{c,\perp} = \frac{l_{c,90,ef}}{l} k_{c,90}, \quad (4.27)$$

jossa  $l$  on puristusalueen pituus syiden suunnassa,  $l_{c,90,ef}$  puristusalueen efektiivinen pituus ja  $k_{c,90}$  materiaalista riippuva kiskopaineekerroin. Efektiivinen pituus saadaan kaavalla

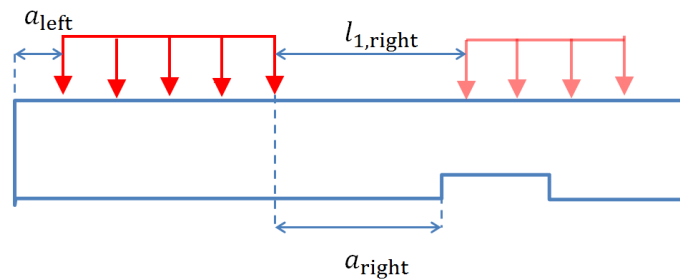
$$l_{c,90,ef} = l + \min \left( \frac{30\text{mm}}{l}, \frac{l}{a_{\text{left}}} \right) + \min \left( \frac{30\text{mm}}{l}, \frac{l}{a_{\text{right}}} \right), \quad (4.28)$$

jossa olevat mitat  $a_{\text{left}}$  ja  $a_{\text{right}}$  kuvaavat puristetun alueen etäisyyttä sauvan reunasta tai loveuksesta ja  $l_1$  etäisyyttä toisesta puristetusta alueesta. Nämä on esitetty kuvassa 4.9

Kerroin  $k_{c,90}$  voidaan ottaa taulukosta 4.4, mikäli

$$l_1 \geq \frac{h}{2} \quad (4.29)$$

puristusalueen kummallakin puolella, kun  $h$  on sauvan poikkileikkauksen korkeus. Muutoin  $k_{c,90} = 1,0$ .



**Kuva 4.9:** Kiskopainekorotuksen määrittämiseen vaaditut geometriset mitat.

**Taulukko 4.4:**  $k_{c,90}$  -kertoimenarvot eri tapauksissa ja eri materiaaleilla.

Materiaali	Muuta	$k_{c,90}$
Havupuinen sahatavara	-	1,25
Havupuinen liimapuu	-	1,5
Kerto-Q	syrjäpinta	1,3
Kerto-LVL	lapepinta	1,4

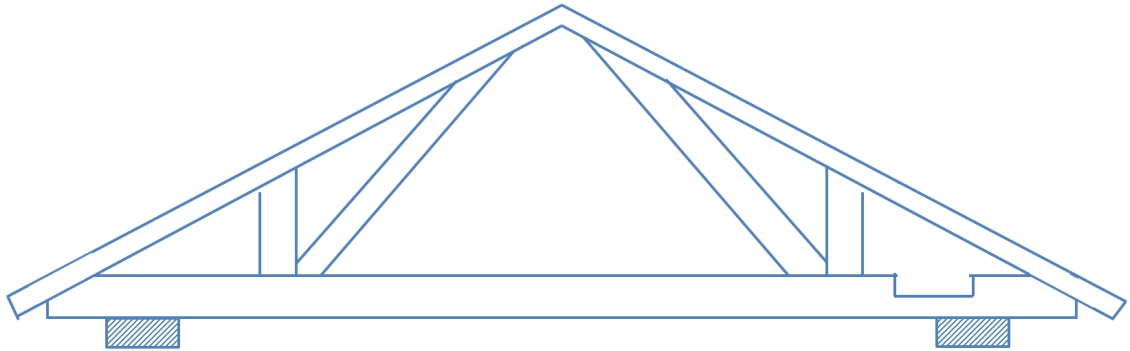
#### 4.4.2 Sauvan kiskopainekorotukset

Tässä käsitellään, miten kiskopainekorotukset huomioitiin mitoitusohjelmassa. Kuvassa 4.10 on esitetty tuettu ristikko, jonka alapaarteen päissä on viisteet ja reunassa loveus. Kuten luvussa 3.1 mainittiin, voidaan sauvojen välisiä puristuskontakteja käyttää hyödyksi liitosmitoituksessa. Tämän vuoksi kiskopainekorotus tulisi huomioida myös uumasauvojen ja alapaarteen välillä.

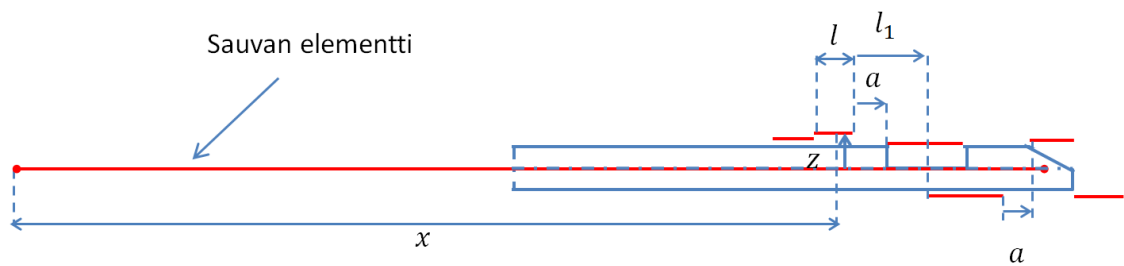
Mitoitusohjelmassa sauvalla olevia puristettuja alueita, loveuksia ja viisteitä kutsutaan kollektiivisesti sauvan alueiksi. Alapaarteen oikean puoliskon alueet esitetään kuvassa 4.11.

Jokaiselle alueelle on määritetty tyyppi –puristusalue, loveus, viiste tai pääty. Mitoitusohjelma saa alueiden sijainnit (kuvassa  $x$  ja  $z$ ), koot ja tyypit parametrina. Mitoitusohjelma määrittää tämän perusteella  $l_1$  ja  $a$  –mitat jokaisen puristusalueen kummallekin puolelle.

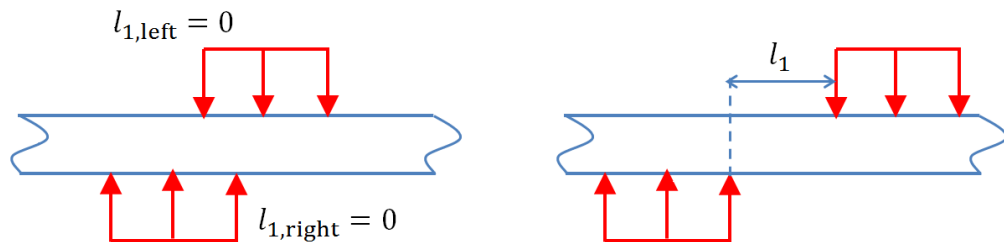
Myös sauvan vastakkaisilla puolilla olevat alueet vaikuttavat toisiinsa, aivan kuin ne olisivat samalla puolella sauva. Tämä on havainnollistettu kuvassa 4.12.



**Kuva 4.10: Ristikko, jonka alapaarteessa on loveus.**



**Kuva 4.11: Alapaarten oikean puolikkaan alueet.**



**Kuva 4.12: Vastakkaisilla puolilla olevien alueiden vaikutus kiskopainekorotusten laskennassa käytettäviin mittoihin.**

Siitä, miten vastakkaisilla puolilla sijaitsevat alueet tarkalleen ottaen vaikuttavat toisiinsa ei ole tietoa. EC5:n alkuperäisessä -versiossa (6) esitetään periaatekuvat tämän huomioimisesta, kuitenkin lisäyksessä A1 (19) periaatekuvat on poistettu. Tämän vuoksi mitoitusohjelmassa pyrittiin käyttämään mahdollisimman varmallalla puolella olevia menetelmiä.

#### 4.5 Viistosti syihin nähden kohdistuva puristus

Sauvojen välisissä puristuskontakteissa ja joidenkin rakenteellisten tukien tapauksessa tulee tarve mitoittaa puristus, joka kohdistuu vinosti syihin. Tällöin puristuslujuus määritetään kaavalla

$$f_{c,\psi,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \sin^2 \psi + \cos^2 \psi}, \quad (4.30)$$

Jossa  $\psi$  on puun syysuunnan ja puristuspinnan normaalin välinen kulma. Kaava perustuu kokeellisiin tuloksiin (9 ss. B2/3 - B2/5). Puristuskapasiteetti on täten

$$R_{c,\psi,d} = f_{c,\psi,d} A \quad (4.31)$$

Puristuslujuuden kaavan kohtisuoralle komponentille on mahdollista käyttää kiskopainekorotusta. Tässä mitoitusohjelman versiossa tätä ei kuitenkaan toteutettu. Edellä mainittu kaava perustuu kokeellisiin tuloksiin.

## 5 SUUNNITTELUOHJEEN MUKAINEN LIITOSMITOITUS

### 5.1 Yleistä

Naulalevyt valmistetaan teräksestä, joka käyttäytyy verrattain ennustettavasti. Lujuusjakauman keskihajonta on pieni.

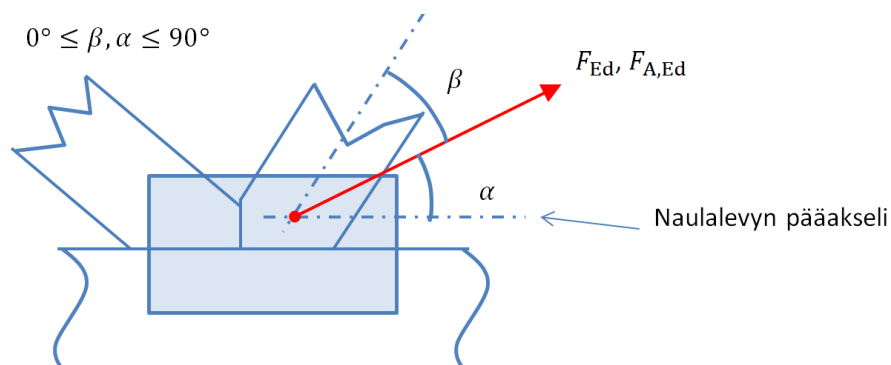
Naulalevyn vaatimukset on esitetty standardissa EN 14545:2008 (E) (20). Tämä yhdessä standardin EN 1075:1999 (21) kanssa määrittää kokeelliset menetelmät, joilla naulalevyjen lujuus varmennetaan.

Pienillä kuormituksilla naulalevyliitokset käyttäytyvät verrattain lineaarisesti. Lähellä maksimikapasiteettia liitosten jäykkyys laskee merkittävästi. Sauvojen sijoitustarkkuus vaikuttaa rakenteen käyttäytymiseen ratkaisevasti. Muutaman millin rako sauvojen välillä laskee naulalevyliitoksen kapasiteettia kymmeniä prosentteja. Naulalevyjen ja puusauvojen sijoitustarkkuuden vaikutusta rakenteen kestävyYTEEN on tutkittu laskennallisesti artikkelissa Probabilistic Analysis and Optimization of Roof Trusses (22). Ari Kevarinmäki tutkii tätä kokeellisesti väitöskirjassaan (11).

### 5.2 Merkinnot ja käsitteet

#### 5.2.1 Voimien ja naulalevyjen suuntakulmat

Suunnitteluohjeessa käytetään kulmaa  $\alpha$  kuvaamaan tartunta-alaan kohdistuvan rasituksen ja naulalevyn pääakselin välistä kulmaa ja  $\beta$  rasituksen ja puun syysuunnan välistä kulmaa. Kulmat on havainnollistettu kuvassa 5.1.



**Kuva 5.1:** Voiman ja naulalevyn suuntaa kuvaavat kulmat  $\alpha$  ja  $\beta$ . Voimat  $F_{Ed}$  ja  $F_{A,Ed}$  kohdistuvat puuhun.

Mitoitusohjelma toteutettiin vektoreilla, joten kulmia tarvittiin lähinnä suunnitteluohjeen kaavojen tulkitsemisessa. Tietyissä kaavoissa käytetään kulmien astearvoja. Näissä kaavoissa kulmien arvot rajataan välille  $0..90^\circ$ . Kulmat määritettiin seuraavilla kaavoilla:

$$\cos(\alpha) = \frac{|F_x|}{|F|} \quad (5.1)$$

$$\alpha = \arccos(\cos(\alpha)) \quad (5.2)$$

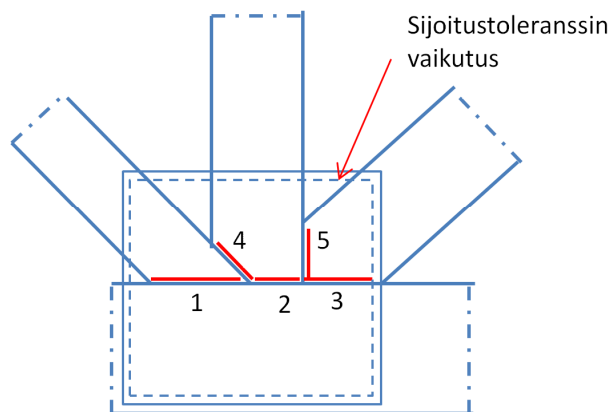
$$\cos(\beta) = \frac{|\vec{F} \cdot \hat{d}|}{|F|} \quad (5.3)$$

$$\beta = \arccos(\cos(\beta)), \quad (5.4)$$

joissa  $\vec{F}$  on kuormittava voimavektori ja  $\hat{d}$  puusauvan lokaalin x-akselin kuvaava yksikkövektori. Kaavassa (5.1) itseisarvon ottaminen rajaa kulman yksikköympyrän oikealle puoliskolle, eli välille  $-90..90^\circ$ . Arkuskosinifunktion arvoalue rajaa kulman arvon edelleenkin välille  $0..90$  astetta.

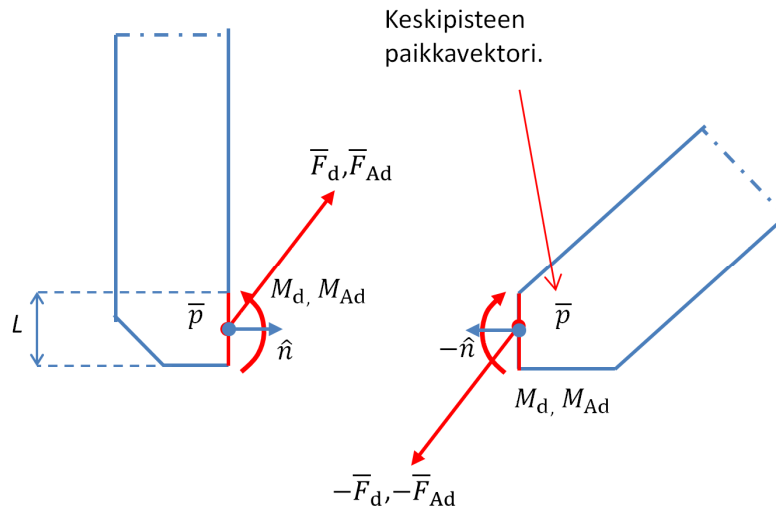
### 5.2.2 Sauvojen väliset kontaktipinnat ja levysaumamat

Puukontaktien hyödyntämistä ja levylujuuden laskentaa varten tarvitaan tieto liitoksessa olevien sauvojen välisistä kontaktipinnoista ja toisaalta sauvojen välisistä naulalevysaumoista. Ainoastaan ne kohdat huomioidaan, joissa on päällekkäin sekä naulalevyä, että puuta. Pinnoista vähennetään naulalevyn sijoitustoleranssi tarpeen vaatiessa. Näin ollen kontaktipinnat ja levysaumamat ovat ohjelmallisesti toisiaan vastaavia. Esimerkki liitoksessa olevista kontaktipinnoista ja levysaumoista on esitetty kuvassa 5.2.



**Kuva 5.2: Liitosalueen kontaktipinnat/levysaumamat.**

Yksittäiseen kontaktipintaan liittyvät merkinnät ja voimasuureet on esitetty kuvassa 5.3. Kuvassa piste  $\bar{p}$  kuvaa kontaktipinnan keskipisteen sijaintia liitoksen koordinaatistossa. Voima  $\bar{F}_d$  kuvaa kontaktipinnan ja liitossauman yli välittyvää kokonaisvoimaa. Voima  $\bar{F}_{Ad}$  taas kuvaa pelkästään naulalevyjen kautta välittyvää puukontakteilla redusoitua voimaa. Sama pätee momenteille. Aiemmin mainitut tartunta-alan painopisteeseen kohdistuvat voimat  $\bar{F}_{Ed}$  ja  $\bar{F}_{A,Ed}$  ja momentit  $M_{Ed}$  ja  $M_{A,Ed}$  lasketaan keräämällä voimat ja momentit kontaktipinnoilta.

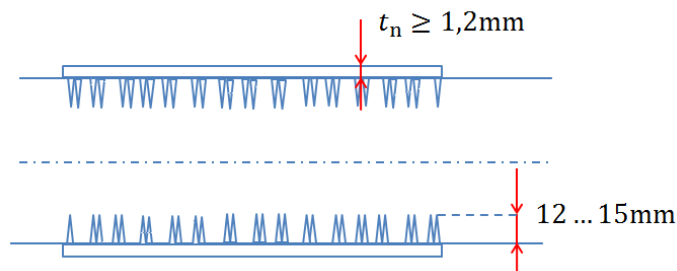


**Kuva 5.3: Yksittäinen kontaktipinta merkintöineen.**

### 5.3 Tukialueen vahvistaminen naulalevyillä

Kuten luvussa 4.4 kerrottiin, tulee syihin nähden kohtisuoraan puristetulla puulla syiden kantokyky mitoittavaksi tekijäksi. Tätä voidaan paikata sijoittamalla naulalevyt tukialueen kohdalle. Suunnitteluohje antaa tarkan ohjeistuksen tällaisten naulalevyjen vaatimuksista.

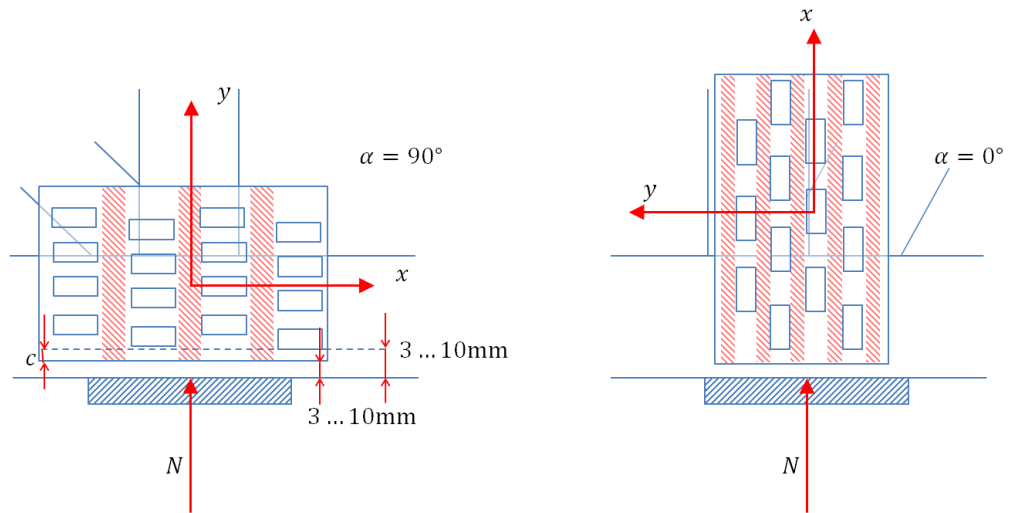
Naulalevyn myötölujuuden tulee olla vähintään 350 MPa, nimellispaksuuden 1,2 mm ja naulalevypiikkien pituuden 12..15 mm kuvan 5.4 mukaisesti.



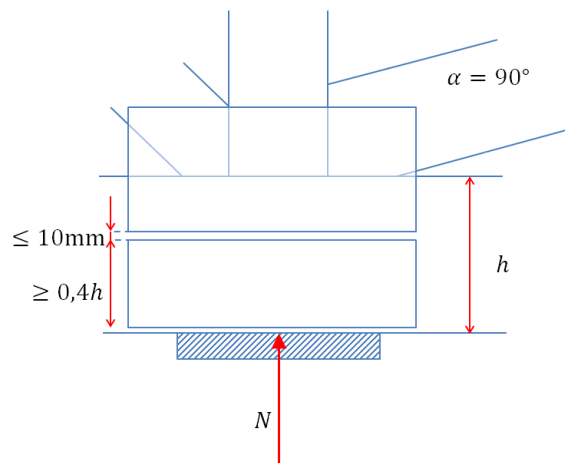
**Kuva 5.4: Naulalevyn paksuuden ja piikkien vaaditut mitat.**

Naulalevyn reikäpinta-alan tulee olla 25-30%. Naulalevyteräksen tulee kulkea suorana yhtenäisenä alueena kuormitussuunnassa. Naulalevyt tulee sijoittaa joko kuormituksen suuntaisesti  $\alpha = 0^\circ$  tai kohtisuoraan  $\alpha = 90^\circ$ . Naulalevyn etäisyys sauvan alareunasta tulee olla 3..10 mm, kun sijoitustoleranssi on huomioitu. Nämä vaatimukset on havainnollistettu kuvassa 5.5.

Naulalevyn tulee ulottua paarteen yläreunaan asti. Mikäli näin ei ole, voidaan käyttää kahta erillistä naulalevyä tuen vahvistamiseen. Alemman naulalevyn täytyy tällöin olla vähintään 40% paarteen korkeudesta ja ylemmän naulalevyn etäisyyden alemmasta enintään 10 mm kuvan 5.6 mukaisesti.



**Kuva 5.5: Vaatimukset vahvistukseen käytettävän naulalevyn sijoittamiselle.**



**Kuva 5.6: Vaatimukset, kun käytetään kahta päällekkäistä naulalevyä vahvistukseen.**





## 5.4 Paarteen halkeaminen liitoksessa

Reunaliitoksessa tulee tarkistaa, ettei puu halkea syihin kohdistuvan kohtisuoran vedon seurauksena. NR -ohjeessa puhutaan paarteen halkeamisesta, luultavasti siitä syystä, että uumasauvojen liitokset ovat aina sauvanpääliitoksia.

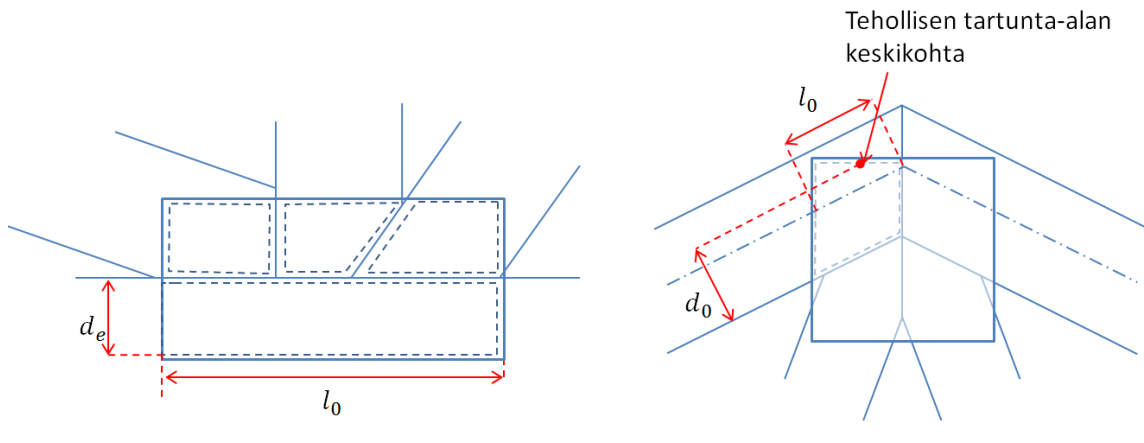
Sauvan kapasiteetti kohtisuoralle vedolle saadaan kaavalla

$$R_{FT} = 14bw \sqrt{\frac{d_e}{1 - \frac{d_e}{h}}} \quad (5.6)$$

jossa  $b$  on sauvan poikkileikkauksen leveys,  $h$  korkeus ja  $w$  mitta, joka lasketaan kaavalla

$$w = \max \left\{ \left( \frac{l_0}{100} \right)^{0,35}, 1 \right\} \quad (5.7)$$

Kaavojen mittojen yksikkö on mm ja voiman yksikkö N. Kaava perustuu koetuloksiin, joten se ei ole dimensiollisesti oikein. Kaavoissa esiintyvät mitat  $l_0$  ja  $d_e$  esitetään kuvassa 5.8 sekä tavalliselle liitokselle, että taitteelliselle paarrejatkokselle.



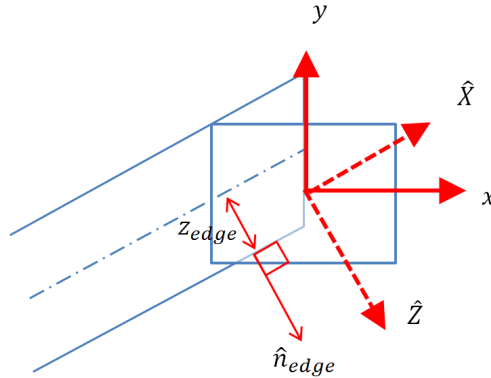
**Kuva 5.8: Paarteen halkeamisessa esiintyvät mitat  $l_0$  ja  $d_e$ .**

Mitta  $l_0$  on nauvalaevyn keskimääräinen peittopituus syysuunnassa, ja  $d_e$  tehollisen alan keskimääräinen peittokorkeus syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa. Nämä mitat mitoitusohjelma saa parametrina.

Kohtisuoran voimakomponentin määrittämiseksi tulee määrittää reunan normaali liitoksen koordinaatistossa. Vinon paarrejatkoksen tapauksessa nauvalaevy voi olla vinossa paarteeseen nähden. Tätä varten funktio saa myös sauvan lokaalin z-koordinaatin siinä kohdassa, missä reunaliitoksen nauvalaevy ylittää sauvan rajan. Kohtisuoran voiman

suunnan määrittäminen esitetään seuraavassa. Kaavat esitetään liitoksen koordinaatistossa. Käytetyt merkinnät ja vektorit on esitetty kuvassa 5.9.

Ohjelma saa yleisesti parametrina myös liitokseen liittyvien sauvojen lokaaleiden x-akselien suuntaiset yksikkövektorit  $\hat{X}$  liitoksen koordinaatistossa.



**Kuva 5.9: Reunan normaalin määrittämiseen liittyvät merkinnät.**

Sauvan lokaalin z-akselin suuntainen yksikkövektori  $\hat{Z}$  voidaan määrittää kääntämällä vektoria  $\hat{X}$   $90^\circ$  myötäpäivään. Vektorin  $\hat{Z}$  komponentit määritetään kaavoilla

$$\hat{Z}_x = \hat{X}_y. \quad (5.8)$$

$$\hat{Z}_y = -\hat{X}_x. \quad (5.9)$$

Reunan normaali on joko tämän vektorin suuntainen tai sitten vastakkainen riippuen siitä, kummalla puolella sauvaa naulalevy sijaitsee. Lopullinen normaalivektori saadaan kaavalla

$$\hat{n}_{edge} = \hat{Z} \cdot \frac{|z_{edge}|}{z_{edge}}. \quad (5.10)$$

Paarretta halki repivä voima saadaan projisoimalla liitosvoima tälle vektorille ja huomioimalla voima ainoastaan silloin, kun se on vetävä.

$$F_{FT} = 2 \cdot \max \left\{ \bar{F}_{ED} \cdot \hat{n}_{edge}, 0 \right\}. \quad (5.11)$$

Kerroin 2 tulee siitä, että liitoksen kummallakin puolella on naulalevy, joka kohdistaa voiman puuhun. Paarteen halkeamisen käyttöaste saadaan kaavalla

$$ur_{FT} = \frac{F_{FT}}{R_{FT}}. \quad (5.12)$$

Mittojen  $l_0$  ja  $d_e$  keskinäisten suuruuksien vaikutusta paarteen keston tutkimiseksi Mathcad –ohjelmalla. Kokeilussa määrättiin, että

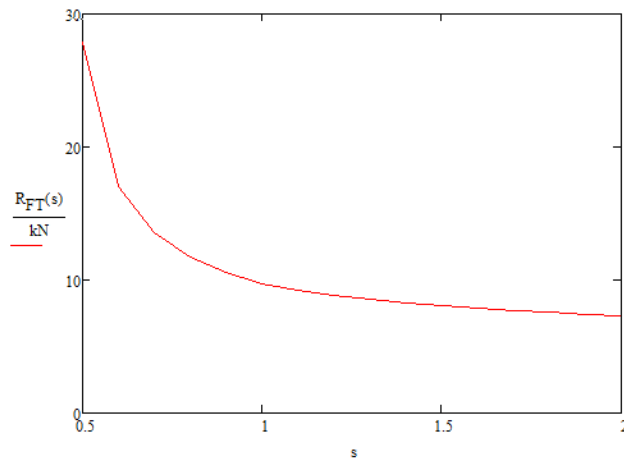
$$l_0 \cdot d_e = 100 \cdot 100 \text{ mm}^2 \quad (5.13)$$

ja asetettiin suhde

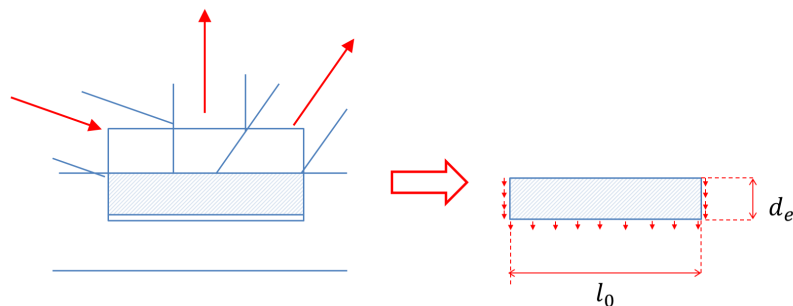
$$s = \frac{l_0}{d_e} \quad (5.14)$$

Paarteen kesto suhteen  $s$  funktiona on esitetty kuvassa 5.10. Kuvasta nähdään, että kun  $s$  on pieni, eli mitta  $d_e$  verrattain iso, on paarteen kesto huomattavasti suurempi, kuin toisin päin. Taustalla olevaa ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 5.11. Tästä nähdään, että peittopituus  $l_0$  kuvaa syitä vastaan kohtisuoran vetolujuuden tuottamaa kapasiteettia, kun taas peittokorkeus  $d_e$  kuvaa liitosalueen läpi kulkevien syiden katkeamista / taipumista, eli mahdollisesti leikkauslujuudelta tulevaa kapasiteettia.

Puun kohtisuora vetolujuus on n. 15-25% puun leikkauslujuudesta, joten tämä selittää, miksi peittokorkeus on niin dominoiva peittopituuteen nähden. Myös kaavasta (5.7) nähdään, että peittopituudella ei ole mitään merkitystä 100mm:iin asti.



**Kuva 5.10: Mittojen  $l_0$  ja  $d_e$  keskinäisen suhteen  $s$  vaikutus paarteen halkeamiskapasiteettiin  $R_{FT}$ .**



**Kuva 5.11: Paarteen halkeamiskestävyyteen vaikuttavien mittojen lujuusopillinen merkitys.**

## 5.5 Taivutuslujuuden korotus liitossolmun kohdalla

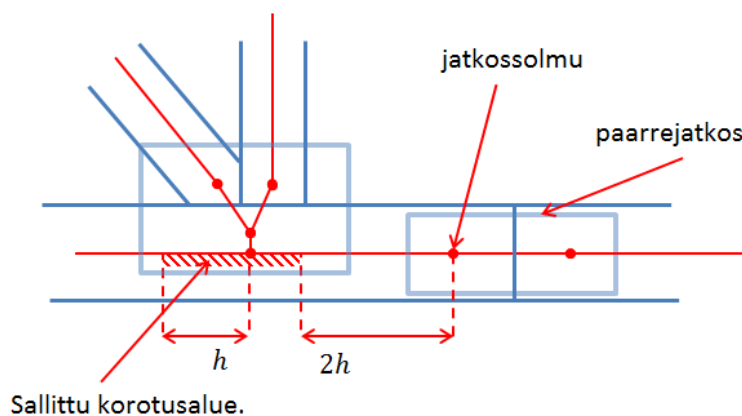
Suunnitteluohjeen mukaan paarteen taivutuslujuutta voidaan korottaa liitossolmun läheisyydessä, mikäli liitoksen uumasauvoilta tuleva voiman resultantti on puristava ja paarteen taivutusmomentti on sellainen, että paarteen uumasauvoille vastakkainen puoli on venynyt. Tämän vuoksi on tärkeää, että sauvan y-akseli osoittaa aina samaan suuntaan. Tällöin momentin etumerkki kertoo, kumpi puoli sauvasta on vedolla.

Syy edellä mainittuun vaatimukseen on se, että uumasauvoilta tulevan resultantin ollessa vetävä, muodostuu taivutuksen ja paarteen halkeamisen välille yhteisvaikutus, jolloin lujuutta ei voida korottaa.

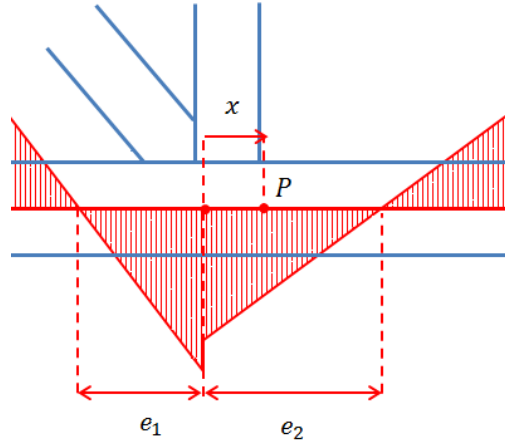
Teknisesti lujuuden korotus päätettiin toteuttaa momentin redusointina, koska puumitoituksen kaavoissa taivutuslujuuden korotus tietyllä kertoimella tuottaa saman tuloksen..

Lujuutta voidaan redusoida etäisyydellä  $h$  liitossolmusta, kun  $h$  on paarteen korkeus. Lujuutta ei saa kasvattaa alle  $2h$ :n etäisyydellä paarrejatkoksolmusta. Sallittu korotusalue on esitetty kuvassa 5.12.

Lujuutta korotetaan kertoimella  $k_{m,1}$ . Tätä varten tulee tutkia taivutusmomenttipinnan muoto. Olkoon  $e_1$  on taivutusmomenttikuvion nollakohdan etäisyys liitossolmusta vasemmalla puolella ja  $e_2$  etäisyys oikealla puolella. Tutkitaan lujuuden korotusta pisteessä  $P$  kuvassa 5.13.



**Kuva 5.12: Sallitun alueen määrittäminen taivutuslujuuden korotukselle.**



**Kuva 5.13: Taivutusmomentin nollakohdat ja tarkastelupiste P.**

Taivutusmomentin nollakohdan suurin etäisyys saadaan kaavalla

$$e_{\max}(x) = \max \left\{ \begin{array}{l} e_1 + x \\ e_2 - x \end{array} \right. \quad (5.15)$$

Määritetään materiaalista riippumaton kerroin

$$k_{m,1,rel}(x) = \begin{cases} \frac{3}{2} - \frac{1}{6} \frac{e_{\max}(x)}{h}, & e_{\max}(x) \leq 9h \\ 1, & e_{\max}(x) \leq 3h \\ 0, & e_{\max}(x) > 9h \vee |x| > 1h \end{cases} \quad (5.16)$$

Lopullinen lujuuden korotuskerroin saadaan kaavalla

$$k_{m,1}(x) = 1 + (k_{m,1,nom} - 1) \cdot k_{m,1,rel}(x), \quad (5.17)$$

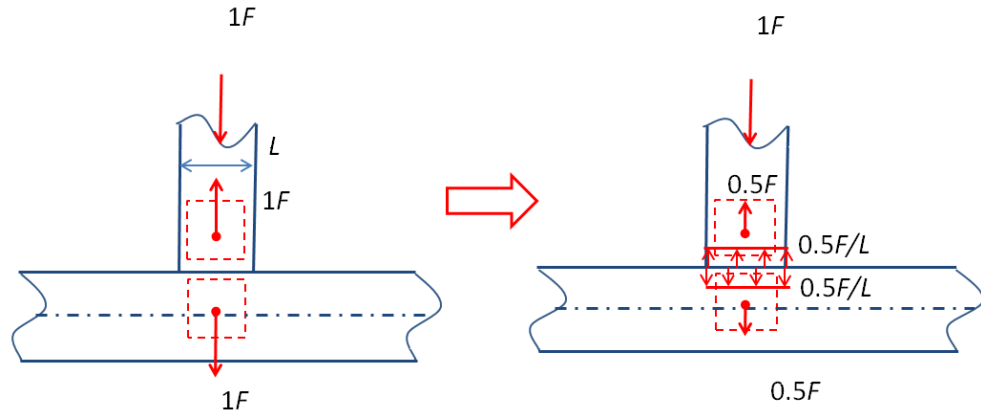
jossa termi  $k_{m,1,nom}$  on materiaalista riippuva korotuskerroin, joka määrittää, miten paljon lujuutta voi maksimissaan korottaa. Vakion arvot esitetään sahatavarakkeelle taulukossa 5.2. Taulukosta nähdään, että suuremmilla lujuusluokilla kerroin on pienempi. Tämä johtunee siitä, että suuremmilla lujuusluokilla lujuus vaihtelee vähemmän, kuten todettiin luvussa 4.1. Kertoimia ei ole esitetty liimapuulle eikä LVL:lle. On mahdollista, että näille kerrointa ei voi käyttää lainkaan, koska näillä lujuus vaihtelee huomattavasti vähemmän.

**Taulukko 5.2: Taivutuslujuuden korotuskertoimen maksimi-arvot.**

Lujuusluokka	$k_{m,1,nom}$
C14 - C20	1,37
C22 - C30	1,30
C35 - C50	1,22

## 5.6 Sauvojen väliset puristuskontaktit

Kuten luvussa 3.1 mainittiin, voidaan sauvojen välisiä puristuskontakteja hyödyntää liitosmitoituksessa vähentämään naulalevyihin kohdistuvia voimia. Vallitsevana periaatteena on, että 50% voimista voidaan ottaa puristuksella. Ajatus esitetään kuvassa 5.14.



**Kuva 5.14: Puukontaktit liitoksessa. Kuvan voimat vaikuttavat puuhun.**

Mitoitusohjelmassa naulalevyisaumat ja sauvojen väliset kontaktipinnat ovat toisiaan vastaavia, kuten luvussa 5.2.2 esitettiin.

Enintään puolet liitossauman yli menevästä kohtisuorasta voimakomponentista voidaan ottaa kontaktilla, eli vähintään puolet otetaan naulalevyillä. Toinen rajoittava tekijä on puun puristuskestävyys kontaktipinnalla. Parrejatkosliitoksissa myös liitosmomentteja voidaan redusoida.

Tässä ei käsitellä sitä, millaisella menetelmällä liitosvoimat jaetaan liitossaumoille ja kontaktipinnoille.

### 5.6.1 Uumasauvojen välinen kontakti

Uumasauvojen välisen kontaktipinnan puristavasta voimakomponentista voidaan vähentää enintään puolet puun puristuskontaktilla, mikäli puu kestää tämän. Ensin määritetään kontaktipinnan puristuskapasiteetti  $R_{c,d}$  lukujen 4.4 ja 4.5 mukaisesti tarkastaen kummankin kontaktipinnan lujuus. Uumasauvojen välisen kontaktivoiman suuruus

$$F_{Cd} = \min \left\{ \begin{array}{l} R_{c,\psi,d} \\ -\bar{F}_d \cdot \hat{n} \end{array} \right. , \quad (5.18)$$

jossa  $\bar{F}_d$  on kontaktipinnan yli kulkeva voimavektori ja  $\hat{n}$  kontaktipinnan normaali luvun 5.2.2 mukaisesti. Tällöin yhden naulalevyn kautta välittyvä redusoitu voimavektori on

$$\bar{F}_{Ad} = \bar{F}_d + \frac{1}{2} F_{Cd} \hat{n} . \quad (5.19)$$

Kaavoja käytetään vain, jos voimalla on puristava komponentti.

### 5.6.2 Uumasauvan ja paarteen välinen kontakti

NR -ohje esittää omat kaavat, joilla paarretta vasten puristetun uumasauvan liitosvoimaa voidaan redusoida. Redusoidun liitosvoiman suuruus lasketaan kaavoilla

$$F_1 = F_{Ed} \sqrt{\cos^2 \psi + 0,25 \sin^2 \psi} \quad (5.20)$$

$$F_2 = \sqrt{(F_{Ed} \cos \psi)^2 + (F_{Ed} \sin \psi - 0,5 k_{c,\perp} b L f_{c,90,d})^2} \quad (5.21)$$

$$F_{A,Ed} = \begin{cases} F_1, & F_{Ed} \sin \psi \leq k_{c,\perp} b L f_{c,90,d} \\ F_2, & F_{Ed} \sin \psi > k_{c,\perp} b L f_{c,90,d} \end{cases} \quad (5.22)$$

joissa  $F_{Ed}$  on redusioimattoman liitosvoiman suuruus,  $\psi$  uumasauvan ja paarteen välinen kulma,  $b$  sauvojen leveys ja  $L$  kontaktipinnan pituus.  $k_{c,\perp}$  on luvun 4.4.1 mukainen kiskopaineekorotus. Redusoidun voiman ja puun syysuunnan välinen kulma  $\beta$  lasketaan kaavalla

$$\beta = \arcsin \left[ \frac{(F_{Ed} \sin \psi - \sqrt{F_{A,Ed}^2 - (F_{Ed} \cos \psi)^2}) \sin(90^\circ - \psi)}{F_{A,Ed}} \right] \quad (5.23)$$

Kaavoissa ei esiinny redusioimattoman liitosvoiman ja uumasauvan välistä kulmaa. Oletetaan, että uumasauvassa ei ole leikkausta, jolloin redusioimaton voima on uumasauvan suuntainen. Voiman paarteen suuntainen komponentti

$$F_{Ed,x} = F_{Ed} \cos \psi, \quad (5.24)$$

jolloin nähdään, että kaavoissa (5.20) - (5.22)

$$F_{A,Ed,x} = F_{Ed,x}, \quad (5.25)$$

paarteen puristuslujuus

$$k_{c,\perp} b L f_{c,90,d} = R_{c,90,d} \quad (5.26)$$

Voiman pystysuora komponentti

$$F_{Ed} \sin \psi = -F_{Ed,y}, \quad (5.27)$$



jolloin kaavassa (5.20)

$$F_{A,Ed,y} = 0,5F_{Ed,y} , \quad (5.28)$$

ja kaavassa (5.21)

$$F_{A,Ed,y} = F_{Ed,y} - 0,5R_{c,90,d} , \quad (5.29)$$

nämä voidaan yhdistää kaavoiksi

$$F_{Cd} = \min \begin{cases} R_{c,90,d} \\ -F_{Ed,y} \end{cases} , \quad (5.30)$$

ja

$$F_{A,Ed,y} = F_{Ed,y} - 0,5F_{Cd} . \quad (5.31)$$

Tällöin puristusvoiman suuruus on

$$F_{c,d} = \min \begin{cases} R_{c,90,d} \\ -\bar{F}_{Ed} \cdot \hat{n} \end{cases} , \quad (5.32)$$

jolloin kontaktilla redusoitu tartuntavoimavektori

$$\bar{F}_{A,Ed} = \bar{F}_{Ed} + \frac{1}{2}F_{Cd}\hat{n} , \quad (5.33)$$

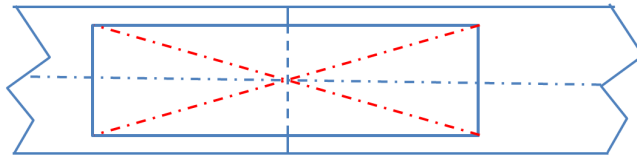
jossa  $\hat{n}$  on uumasauvan ja paarteen välisen kontaktipinnan normaali.

Kaavat (5.20) – (5.22) kuvaavat siis käytännössä samaa periaatetta kuin se, mitä käytetään uumasauvojen välisissä kontakteissa, paitsi että nämä kaavat (5.20) – (5.22) pätevät painopistesolmussa, eivätkä huomioi puristavan voiman epäkeskisyydestä koi-tuvaa vaikutusta liitosmomenttiin. Kaavat myöskin olettavat, että uumasauvassa ei ole leikkausta.

Todennäköisesti suunnitteluohjeessa on haluttu tarjota yksinkertaisempi mene-telmä kontaktivoimien hyödyntämiseen. Näin ollen luvussa 5.6.1 esitettyjä kaavoja (5.18) ja (5.19) päätettiin käyttää myös uumasauvan ja paarteen välisessä kontaktissa. Kiskopaineerotusta käytetään edelleenkin hyväksi.

### 5.6.3 Suora paarrejatkos

Paarrejatkoksessä naulalevyn pääakselin tulee yhtyä puun syysuuntaan ja levy tulee sijoittaa symmetrisesti liitoksen keskipisteeseen nähden. Paarrejatkoksen periaate on esitetty kuvassa 5.15.



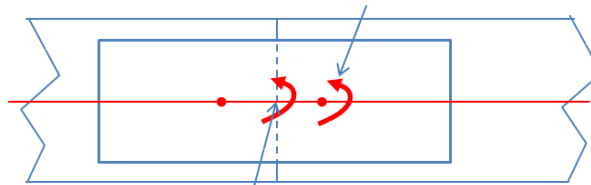
**Kuva 5.15: Paarrejatkos.**

Kuten aiemmin mainittiin, voidaan paarrejatkoksessä sekä momenttia, että normaali-voimaa redusoida kontaktilla.

Suunnitteluohjeessa esitetään, että kaavat redusoivat tartunta-alojen painopisteisiin vaikuttavia voimia. Todellisuudessa kaavat kuitenkin pätevät kontaktipinnan keskipisteessä. Ero on havainnollistettu kuvassa 5.16.

Suunnitteluohjeen  
esittämä tapa:

$$M_{A,Ed} = \frac{1}{2} M_{Ed}$$



Valittu tulkintatapa:

$$M_{Ad} = \frac{1}{2} M_d$$

**Kuva 5.16: Suunnitteluohjeen ehdottama tapa momentin redusoinnille ja valittu toteutustapa.**

Normaalivoiman tapauksessa tällä ei ole merkitystä, eikä taivutusmomenttiinkaan silloin, kun jatkoksen yli menevä taivutusmomentti on vakio. Mikäli paarrejatkos kuitenkin välittää leikkausvoimaa –jolloin momentin arvo ei ole vakio– muuttuu momentin arvo tämän seurauksena riippuen siitä, kumpaa tapaa käytetään. Käytännössä paarrejatkoksissa on pienet leikkausvoimat, joten luultavasti suunnitteluohjeessa on pyritty yksinkertaistamaan ja helpottamaan ohjelmointityötä.

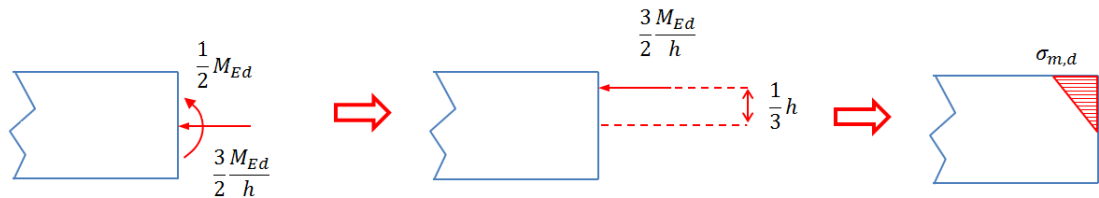
Mikäli liitoksessa on pelkästään taivutusta, eli  $F_{Ed} = 0$ , voidaan naulalevyn yli välittyvä voima ja momentti laskea suunnitteluohjeen kaavoilla

$$F_{A,Ed} = \frac{3M_{Ed}}{2h}. \quad (5.34)$$

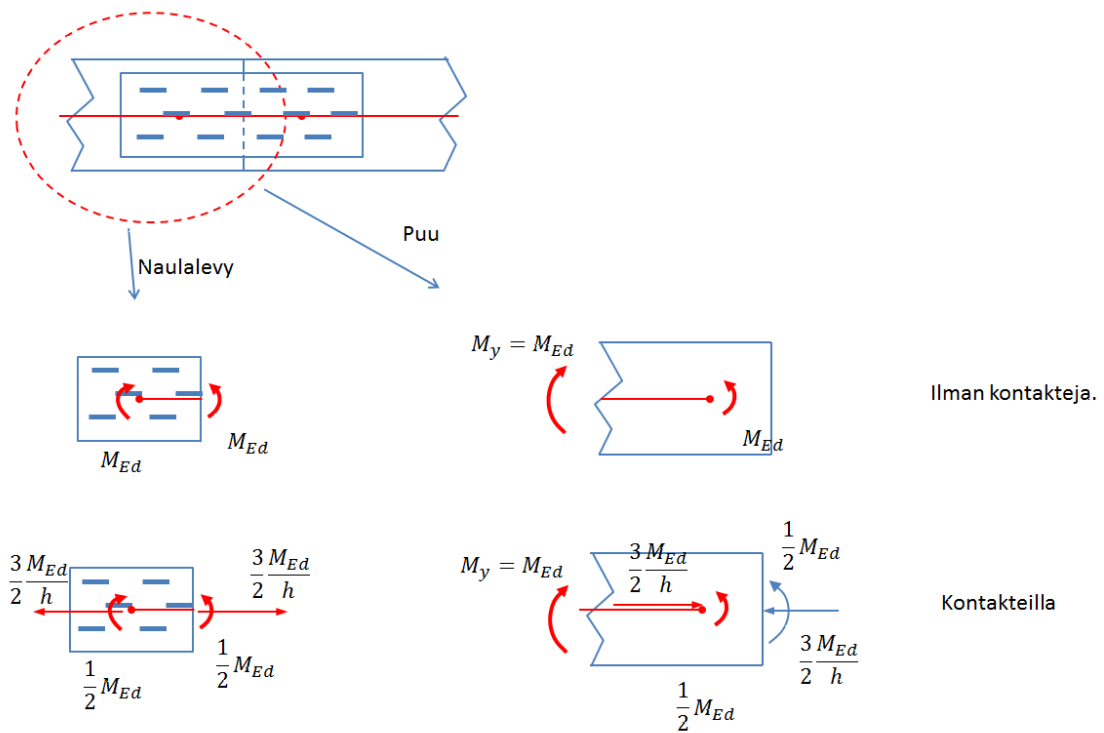
$$M_{A,Ed} = \frac{1}{2}M_{Ed}, \quad (5.35)$$

joissa  $h$  on paarteen korkeus. Puristuskontaktin käyttäminen siis tuo naulalevyyn vetävän voimakomponentin. Kontaktin synnyttämät voimat on esitetty kuvassa 5.17. Kuvan voimat kohdistuvat puuhun.

Voiman kulku sekä puukontaktin, että naulalevyn yli on havainnollistettu naulalevyn puolikkaan ja puusauvan pään vapaakappalekuvilla kuvassa 5.18.



**Kuva 5.17: Kontaktivoiman ja puristusjännityksen välinen yhteys.**



**Kuva 5.18: Puristuskontaktin vaikutus puun ja naulalevyn yli kulkeutuviin liitosvoimiin.**

Kuten aiemmin mainittiin, suunnitteluohjeen kaavat on esitetty tartunta-alan pintakeskiössä. Kuvan tapauksessa tartunta-alan pintakeskiön ja kontaktipinnan voimasuureet ovat samat, joten tällä ei ole merkitystä, mutta mikäli liitoksessa on leikkausvoimaa, muuttuvat momenttienkin arvot, tosin vain vähän.

Käytännössä liitoksessa on lähes aina normaalivoimaa. Vedolla olevan liitoksen redusoiduille voimille suunnitteluohje tarjoaa kaavat

$$F_{A,Ed} = \sqrt{\left(F_{Ed} \cos \beta + \frac{3M_{Ed}}{2h}(1 - \mu_t)\right)^2 + (F_{Ed} \sin \beta)^2}, \quad (5.36)$$

$$M_{A,Ed} = \frac{1}{2}(1 + \mu_t)M_{Ed}, \quad (5.37)$$

joissa

$$\mu_t = \frac{2F_{Ed} \cos \beta}{f_{a,0,0,d}A_{ef}} \leq 1, \quad (5.38)$$

jossa  $f_{a,0,0,d}A_{ef}$  on naulalevyn ja puun välinen tartuntakapasiteetti sauvan suunnassa. Tartuntaa on käsitelty tarkemmin luvussa 5.8. Kirjoitetaan kontaktipinnan yli naulalevyjen kautta välittyvä voima komponenteittain.

$$F_{A,d,x} = F_{d,x} + \frac{3M_d}{2h}(1 - \mu_t)\hat{n}_x, \quad (5.39)$$

$$F_{A,d,y} = F_{d,y}. \quad (5.40)$$

$$M_{A,d} = \frac{1}{2}(1 + \mu_t)M_d, \quad (5.41)$$

Jos kaavoja verrataan pelkästään taivutettuun jatkokseen, nähdään, että puukontaktin vaikutusta redusoidaan kertoimella  $1 - \mu_t$ . Termi  $\mu_t$  voidaan kirjoittaa toisessa muodossa

$$\mu_t = \frac{2F_{d,x}}{R_{a,x,d}} = 2 \cdot ur_{a,x} \leq 1, \quad (5.42)$$

jossa  $R_{a,x,d}$  on naulalevyn tartuntakapasiteetti liitoksen normaalin suunnassa ja  $ur_{a,x}$  tartunnan käyttöaste pelkästään normaalin suuntaisen voimakomponentin seurauksena. Tästä voidaan päätellä, että puristuskontaktia kannattaa hyödyntää vain silloin, kun alle 50% normaalin suuntaisen tartunnan kapasiteetista on käytetty ilman puristusta. Tämä on ymmärrettävää, sillä vedetyissä liitoksissa puristuskontakti muuntaa osan naulalevyille kohdistuvasta momentista vetäväksi voimaksi.

Mikäli liitos on puristettu, tarjoaa NR -ohje seuraavat kaavat. Kun

$$F_{\text{Ed}} \cos \beta \leq \frac{1}{6} f_{c,0,d} b h , \quad (5.43)$$

niin

$$F_{\text{A,Ed}} = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \eta F_{\text{Ed}} \cos \beta - \frac{3M_{\text{Ed}}}{2h} (1 + \mu_c)\right)^2 + (F_{\text{Ed}} \sin \beta)^2} , \quad (5.44)$$

$$M_{\text{A,Ed}} = \frac{1}{2} (1 - \mu_c) M_{\text{Ed}} , \quad (5.45)$$

joissa

$$\eta = \left(\frac{3f_{a,0,0,d} A_{\text{ef}}}{4F_{\text{Ed}} \cos \beta}\right)^2 \leq 1 , \quad (5.46)$$

ja

$$\mu_c = \left(\frac{F_{\text{Ed}} \cos \beta}{2f_{a,0,0,d} A_{\text{ef}}}\right)^2 \leq 0,5 . \quad (5.47)$$

Kirjoitetaan edellä mainitut kaavat vektorimuodossa kontaktipinnan pintakeskiössä. Ehtolause (5.43) tulee muotoon

$$-\bar{F}_d \cdot \hat{n} \leq \frac{1}{6} R_{c,0,d} , \quad (5.48)$$

jossa  $R_{c,0,d}$  on paarteen puristuskapasiteetti syiden suunnassa. Voiman ja momentin laskentakaavat (5.44) ja (5.45) tulevat muotoon

$$F_{\text{A,d,x}} = \frac{1}{2} \eta F_{\text{d,x}} - \frac{3M_d}{2h} (1 + \mu_c) \hat{n}_x , \quad (5.49)$$

$$F_{\text{A,d,y}} = F_{\text{d,y}} \quad (5.50)$$

$$M_{\text{A,d}} = \frac{1}{2} (1 - \mu_c) M_d . \quad (5.51)$$

Kertoimet  $\eta$  ja  $\mu_c$  voidaan esittää paarteen suuntaisen tartunnan käyttöasteen avulla kaavan (5.42) tapaisesti

$$\eta = \left(\frac{3R_{a,x,d}}{4F_{d,x}}\right)^2 = \left(\frac{3}{4ur_{a,x}}\right)^2 \leq 1 , \quad (5.52)$$

$$\mu_c = \frac{F_{d,x}}{2R_{a,x,d}} = \frac{1}{2} \cdot ur_{a,x} \leq 0,5 .$$

Mikäli puristava voima on suurempi, eli

$$-\bar{F}_d \cdot \hat{n} > \frac{1}{6} R_{c,0,d} , \quad (5.53)$$

antaa NR-ohje kaavat

$$F_{A,Ed} = \sqrt{\left( \frac{F_{Ed} \cos \beta}{10} \left( \frac{6F_{Ed} \cos \beta}{f_{c,0,d}bh} + 1 \right) \right)^2 + (F_{Ed} \sin \beta)^2} , \quad (5.54)$$

$$M_{A,Ed} = \frac{1}{4} M_{Ed} . \quad (5.55)$$

Voimavektorin komponenteiksi muunnettuna ja kontaktipinnan suhteen kirjoitettuna näistä tulee

$$F_{A,d,x} = \frac{F_{d,x}}{10} \left( \frac{6F_{d,x}}{R_{c,0,d}} + 1 \right) , \quad (5.56)$$

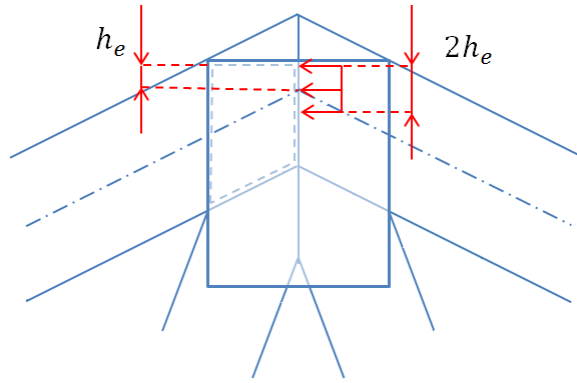
$$F_{A,d,y} = F_{d,y} \quad (5.57)$$

$$M_{A,d} = \frac{1}{4} M_d , \quad (5.58)$$

Nähdään, että kontaktilla voidaan vähentää naulalevyihin kohdistuvia rasituksia merkittävästi.

#### 5.6.4 Vino parrejatkos

Vinossa parrejatkoksessä kontaktia ei voi käyttää momenttien redusoimiseen. Suurin paarteiden välille sallittu puristava voima on havainnollistettu kuvassa 5.19.



**Kuva 5.19: Kuperasti taitteellinen paarrejatkos.**

Suunnitteluohje tarjoaa kaavan kontaktivoiman laskennalle

$$F_{c,d} = F_{Ed} (\cos \beta_E \cos \psi \pm \sin \beta_E \sin \psi) \leq f_{c,\psi,d} 2h_e b, \quad (5.59)$$

jossa  $\beta_E$  on redusoimattoman voiman suuntakulma.  $\pm$  -merkin arvo riippuu liitosvoiman suunnasta. Kaavasta josta voidaan tunnistaa kaksinkertaisen kulman kosinin kaava

$$F_{c,d} = F_{Ed} \cos(\beta_E + \psi) \leq f_{c,\psi,d} 2h_e b. \quad (5.60)$$

Puuhun kohdistuvan puristusvoiman suuruus kontaktipinnan kohdalla on tällöin

$$F_{c,d} = -\bar{F}_d \cdot \hat{n} \leq R_{c,\psi,d}, \quad (5.61)$$

jolloin puristusvoimavektori on

$$\bar{F}_{c,d} = -F_{c,d} \hat{n}, \quad (5.62)$$

joka voidaan vähentää yksittäisen naulalevysauman kautta kulkeutuvasta voimasta

$$\bar{F}_{A,d} = \bar{F}_d - \frac{1}{2} \bar{F}_{c,d}. \quad (5.63)$$

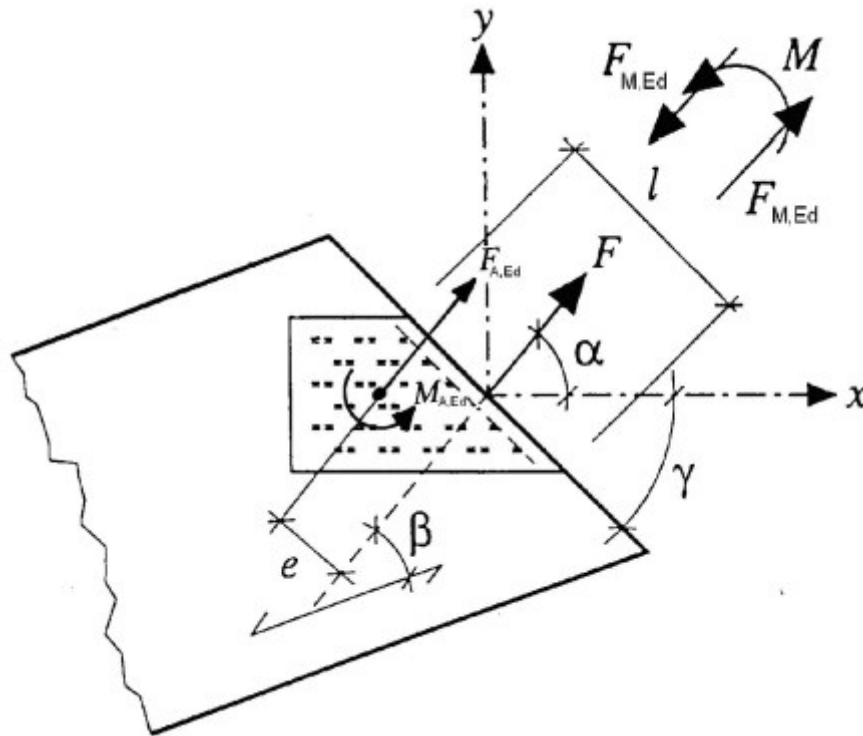
Tässäkin kaavassa sovelletaan periaatetta, että enintään 50 % voimasta voidaan ottaa puristuskontaktilla.

## 5.7 Levylujuus

Kuten aiemmin mainittiin, myös liitoksen sauvojen väliset naulalevysaumot tulee tarkistaa. Naulalevy ei ole homogeeninen, vaan siinä on piikkien meistosta syntyneitä suora-kaidemaisia reikiä. Mikäli levyä rasitetaan leikkausvoimalla, syntyy näiden reikien väli-

siin kannaksiin taivutusta, jolloin levyä ei voida mitoittaa pelkän leikkausjännityksen mukaan. Levy on altis lommahdukselle sekä puristettuna, että leikattuna. Tämän vuoksi levylujuus riippuu levysaumassa vaikuttavien rasitusten etumerkeistä. Levysaumat mitoitetaan likimääräisillä kaavoilla, joissa käytetyt laskentaparametrit määritetään koetuloilla. (11 ss. 96-103)

Levylujuutta mitoitettaessa voimat voidaan jakaa naulalevysaumoille plastisuusteorian mukaisesti tasapainoehdot toteuttavalla tavalla. Naulalevysaumat voidaan tämän jälkeen mitoittaa toisistaan riippumatta. Kuvassa 5.20 on esitetty yksittäisen levysauman mitoittamiseen liittyvät merkinnät.



**Kuva 5.20: Levysauman lujuuden laskentaan liittyvät merkinnät (1 s. 55).**

Voima  $F$  vastaa aiemmin esitettyä voimaa  $\bar{F}_d$  ja momentti  $M$  sauman momenttia  $M_d$ . Kuvassa esiintyvä voima  $F_{M,Ed}$  on momentti  $M_d$  muutettuna voimapariksi. Sen suuruus lasketaan kaavalla

$$F_{M,Ed} = \frac{2M_d}{L}, \quad (5.64)$$

jossa  $L$  on levysauman pituus luvun 5.2.2 mukaisesti. Suunnitteluohjeessa levyn molempien pääsuuntien voimat lasketaan kaavoilla

$$F_{x,Ed} = F \cos \alpha \pm 2F_{M,Ed} \sin \gamma, \quad (5.65)$$

$$F_{y,Ed} = F \sin \alpha \pm 2F_{M,Ed} \cos \gamma, \quad (5.66)$$



joissa  $\pm$  -merkki kuvaa sitä, että toisella puolella saumaa momentista aiheutuva voima on puristava ja toisella vetävä. Mitoitusohjelmassa kaavat kirjoitettiin vektorimuodossa liitosalueen koordinaatistossa. Momentista aiheutuva voima

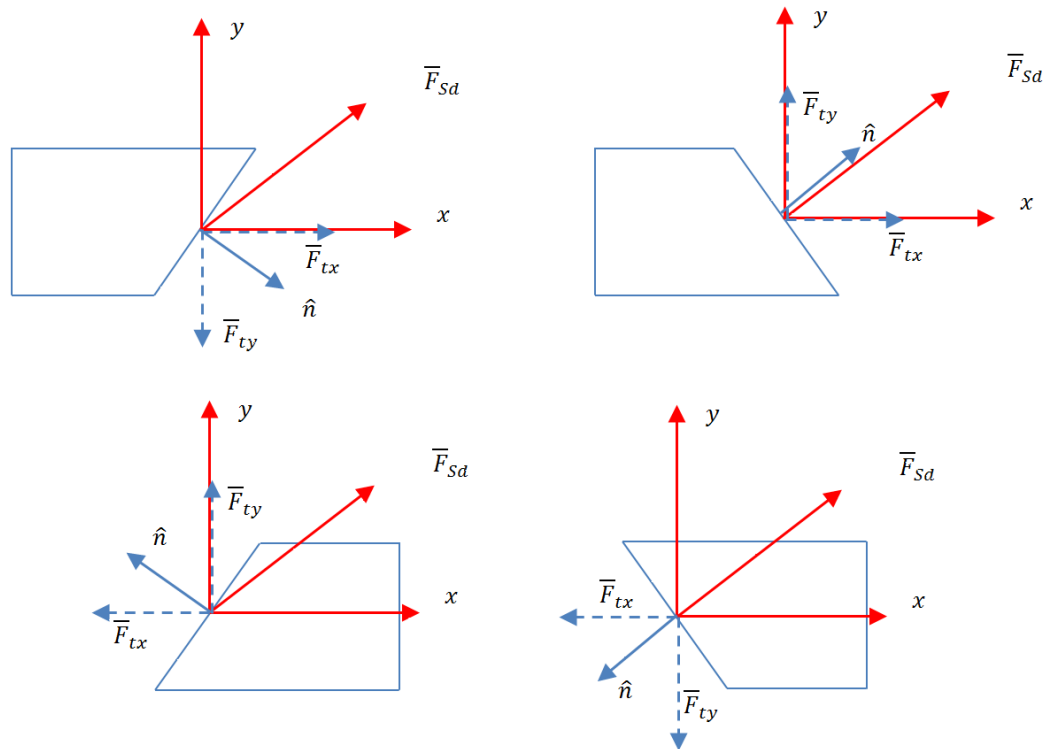
$$\bar{F}_{M,Sd} = \frac{2M_d}{L} \hat{n}, \quad (5.67)$$

jossa  $\hat{n}$  on levysauman normaalivektori. Sauman voimat ovat vektoreissa

$$\bar{F}_{Sd,1} = \bar{F}_d + 2\bar{F}_{M,Sd}, \quad (5.68)$$

$$\bar{F}_{Sd,2} = \bar{F}_d - 2\bar{F}_{M,Sd}, \quad (5.69)$$

joista kumpikin tapaus tarkistetaan erikseen. Tästä kumpaankin viitataan yhteisesti vektorilla  $\bar{F}_{Sd}$ . Koska liitoksen koordinaatisto yhtyy levyn pääsuuntiin, saadaan vektorista  $\bar{F}_{Sd}$  suoraan pääsuuntien rasiusten suuruudet. Lujuuden mitoituksessa tulee kuitenkin tietää, ovatko voimat  $F_{x,Ed}$  ja  $F_{y,Ed}$  vetoa, vai puristusta. Tämä taas riippuu levysauman suunnasta. Vetävän voiman suuntaiset vektorit  $\bar{F}_{tx}$  ja  $\bar{F}_{ty}$  erisuuntaisille levysaumoille on esitetty kuvassa 5.21. Kaikissa kuvissa esiintyy samansuuntainen voima  $\bar{F}_{Sd}$  ja liitosalueen koordinaatisto.



**Kuva 5.21: Vetävien voimakomponenttien suuntaiset yksikkövektorit eri suuntaisilla levysaumoilla.**

Kuvasta nähdään, että vetävää voimaa kuvaavat vektorit yhdistyvät sauman normaalin suuntaan. Tämän perusteella x-akselin suuntaiselle rasitukselle saadaan:

$$F_{x,Ed} = \bar{F}_{Sd} \cdot \bar{F}_{tx} = F_{Sd,x} F_{tx,x} = \begin{cases} F_{Sd,x}, & \hat{n}_x \geq 0 \\ -F_{Sd,x}, & \hat{n}_x < 0 \end{cases}, \quad (5.70)$$

Sama analogia pätee y-akselille. Suunnitteluohjeen kaavat (5.65) ja (5.66) siis korvautuvat

$$F_{x,Ed} = \begin{cases} F_{Sd,x}, & \hat{n}_x \geq 0 \\ -F_{Sd,x}, & \hat{n}_x < 0 \end{cases}, \quad (5.71)$$

$$F_{y,Ed} = \begin{cases} F_{Sd,y}, & \hat{n}_y \geq 0 \\ -F_{Sd,y}, & \hat{n}_y < 0 \end{cases}, \quad (5.72)$$

Levyylujuuden käyttöaste saadaan kaavalla

$$ur = \sqrt{\left(\frac{F_{Ed,x}}{R_{x,d}}\right)^2 + \left(\frac{F_{Ed,y}}{R_{y,d}}\right)^2}, \quad (5.73)$$

jossa  $R_{x,d}$  ja  $R_{y,d}$  ovat levyn laskentalujuudet kummassakin pääsuunnassa.

Kuten aiemmin mainittiin, eivät laskentalujuudet ole vakiot, vaan ne riippuvat sekä sauman suunnasta että kummankin kuormituskomponentin etumerkistä. Levyylujuuksien ominaisarvot lasketaan kaavoilla

$$R_{x,k} = \max \left\{ \begin{array}{l} |f_{n,0,k} L \sin(\gamma - \gamma_0 \sin(2\gamma))| \\ |f_{v,0,k} L \cos(\gamma)| \end{array} \right\}, \quad (5.74)$$

$$R_{y,k} = \max \left\{ \begin{array}{l} |f_{n,90,k} L \cos \gamma| \\ |k f_{v,90,k} L \sin \gamma| \end{array} \right\}, \quad (5.75)$$

joissa

$$f_{n,0,k} = \begin{cases} f_{t,0,k}, & F_{x,Ed} > 0 \\ f_{c,0,k}, & F_{x,Ed} \leq 0 \end{cases}, \quad (5.76)$$

$$f_{n,90,k} = \begin{cases} f_{t,90,k}, & F_{y,Ed} > 0 \\ f_{c,90,k}, & F_{y,Ed} \leq 0 \end{cases} \quad (5.77)$$

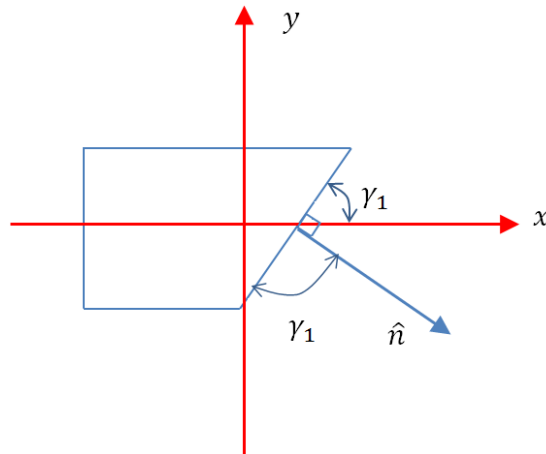
ja

$$k = \begin{cases} 1 + k_v \sin(2\gamma), & F_{x,Ed} > 0 \\ 1, & F_{x,Ed} \leq 0 \end{cases} \quad (5.78)$$

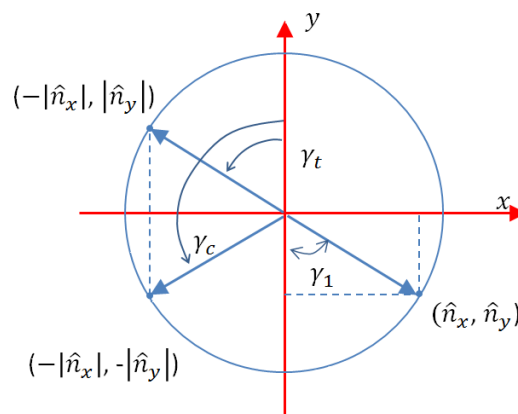
Kaavoissa esiintyvät ominaislujuudet  $f_{t,0,k}$ ,  $f_{t,90,k}$ ,  $f_{c,0,k}$ ,  $f_{c,90,k}$ ,  $f_{v,0,k}$  ja  $f_{v,90,k}$  sekä vakiot  $k_v$  ja  $\gamma_0$  saadaan naulalevylle ominaisesta naulalevylausunnosta. Kaavoissa esiintyvä kulma  $\gamma$  määritellään suunnitteluohjeen mukaan

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_t \in 0 \leq \gamma < \frac{\pi}{2}, & F_{x,Ed} > 0 \\ \gamma_c \in \frac{\pi}{2} \leq \gamma < \pi, & F_{x,Ed} \leq 0 \end{cases} \quad (5.79)$$

Seuraavassa esitetään, miten kulma laskettiin vektoreiden avulla. Alkuperäisen välillä  $0..2\pi$  olevan kulman  $\gamma_1$  ja levysauman normaalin välinen yhteys on esitetty kuvassa 5.22. Kuvassa esitetään 5.23 nämä molemmat yksikköympyrässä. Ympyrän kehälle on myös piirretty kaavassa (5.79) esiintyneet kulmat  $\gamma_t$  ja  $\gamma_c$ .



**Kuva 5.22: Levylujuuden laskennassa käytetty naulalevyn suuntaa kuvaava kulma.**



**Kuva 5.23: Todellinen suuntakulma  $\gamma_1$  ja laskennassa käytetyt  $\gamma_c$  ja  $\gamma_t$ .**

Kuvasta nähdään, että

$$\cos \gamma_1 = -\hat{n}_y . \quad (5.80)$$

kulmaa  $\gamma_1$  ei voida vielä määrittää tämän perusteella, mutta tähän ei ole tarvetta. Koska kulmat  $\gamma_t$  ja  $\gamma_c$  sijaitsevat aina kuvassa esitetyillä kvadranteilla, on  $\gamma_t$  :n kosini aina positiivinen ja  $\gamma_c$  :n negatiivinen. Näin saadaan

$$\cos \gamma_t = |\hat{n}_y| , \quad (5.81)$$

$$\cos \gamma_c = -|\hat{n}_y| . \quad (5.82)$$

Lopulta puristuspuolen ja vetopuolen kulmat voidaan määrittää kosinin käänteisfunktiolla

$$\gamma_t = \arccos(|\hat{n}_y|) \quad (5.83)$$

$$\gamma_c = \arccos(-|\hat{n}_y|) . \quad (5.84)$$

Lopulta levylujuuden mitoitusarvot saadaan kaavalla

$$R_{x,d} = \frac{R_{x,k}}{\gamma_M} , \quad (5.85)$$

jossa  $\gamma_M$  on levylujuuden osavarmuusluku, jonka arvo Suomessa on 1.1. Y-suunnan lujuus saadaan vastaavasti.

## 5.8 Tartunta

Puun ja naulalevyn välinen tartuntalujuus riippuu naulalevyn ja kuormittavan voiman suunnasta puun syysuuntaan nähden. Sallittu lujuus riippuu myös käytetystä puutypistä. Luku perustuu NR-ohjeeseen (1 ss. 53-54).

### 5.8.1 Tartuntajännitys ja käyttöaste

Suunnittelujännitykset saadaan kaavoilla

$$\tau_{F,d} = \frac{F_{A,Ed}}{A_{ef}} \quad (5.86)$$

$$\tau_{M,d} = \frac{M_{A,Ed}}{W_{v,pl}} \quad (5.87)$$

Käyttöaste lasketaan kaavalla

$$ur = \sqrt{\left(\frac{\tau_{F,d}}{f_{a,\alpha,\beta,d}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{F,d}}{f_{a,0,0,d}}\right)^2}. \quad (5.88)$$

### 5.8.2 Tartuntalujuus jännityksen suunnan mukaan

NR -ohje tarjoaa kaavat tartuntalujuuden määrittämiseksi. Kulmat  $\beta$  ja  $\alpha$  määritetään luvun 5.2.1 mukaan. Huom!  $0 \leq \beta, \alpha \leq 90^\circ$ .

Kun  $0 < \beta \leq 45^\circ$ ,

$$f_{a,\alpha,\beta,k} = \max \left\{ \begin{array}{l} f_{a,\alpha,0,k} - (f_{a,\alpha,0,k} - f_{a,\alpha,0,k}) \frac{\beta}{45^\circ} \\ f_{a,0,0,k} - (f_{a,0,0,k} - f_{a,90,90,k}) \sin(\max(\alpha, \beta)) \end{array} \right\} \quad (5.89)$$

ja kun  $45^\circ < \beta \leq 90^\circ$ ,

$$f_{a,\alpha,\beta,k} = f_{a,0,0,k} - (f_{a,0,0,k} - f_{a,90,90,k}) \sin(\max(\alpha, \beta)) \quad (5.90)$$

Syyn suuntainen tartuntalujuuden ominaisarvo

$$f_{a,\alpha,0,k} = f(x) = \begin{cases} f_{a,0,0,k} + k_1 \alpha, & \alpha < \alpha_0 \\ f_{a,0,0,k} + k_1 \alpha_0 + k_2 (\alpha - \alpha_0), & \alpha_0 < \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (5.91)$$

Kaavoissa esiintyvät kertoimet  $k_1$ ,  $\alpha_0$ ,  $k_2$  ja pääsuuntien ominaisarvot  $f_{0,0,k}$  ja  $f_{a,90,90,k}$  esitetään kullekin naulalevyille ominaisessa naulalevylausunnossa. Kertoimien  $k_1$  ja  $k_2$  dimension tulisi kaavojen perusteella olla MPa. Nämä kuitenkin esitetään dimensiottomina ainakin naulalevylausunnoissa (2) ja (23). Vakiot päätettiin tulkita megapascalina.

Kaikissa tutkituissa naulalevylausunnoissa esitettiin samanlainen ohjeistus tartuntalujuuden muuttamisesta puun tiheyden ominaisarvon mukaan kertoimella

$$k_p = \sqrt{\frac{\rho_k}{380 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \quad (5.92)$$

Tiheyden ominaisarvot on taulukoitu liimapuulle ja havupuulle lujuusluokan mukaan esimerkiksi naulalevylausunnossa (2 s. 3). Lisäksi havupuun ominaistiheydet löytyvät taulukosta 4.1. LVL:lle  $k_p = 1$ . Kerto-S:lle ja Kerto-Q:lle on annettu omat ominaisarvot ja vakiot. Kerto T:n ominaislujuus on Kerto-Q:n vastaava kerrottuna luvulla 0,92. Tartunnan mitoituslujuus on

$$f_{a,\alpha,\beta,d} = k_p \cdot \frac{k_{\text{mod}} f_{a,\alpha,\beta,k}}{\gamma_M}. \quad (5.93)$$

Naulalevylausunnossa (24) esitetään korvaavat kaavat tässä esitettyjen kaavojen (4.8)-(4.10) tilalle. Tähän varauduttiin siten, että nämä kaavat voidaan antaa mitoitusohjelmalle erillisenä parametrina. Matlabissa on toiminto, jolla pystytään suorittamaan ulkoa annettu teksti koodina. Tällöin ohjelmakoodia ei tarvitse muokata, mikäli nämä kaavat muuttuvat tai joku toinenkin lausunto esittää omat kaavansa.

## 5.9 Vähimmäisvoima

Jokaisen tartunta-alan tulee kestää sekä levylujuuden, että tartunnan osalta vähimmäisvoima  $\frac{1}{2} F_{r,d}$ , joka vaikuttaa tartunta-alan pintakeskiössä mihin suuntaan tahansa. Voiman suuruus lasketaan kaavalla

$$F_{r,d} = \left( 1,0 + 0,1 \frac{L}{m} \right) \cdot kN, \quad (5.94)$$

jossa L on naulalevyrakenteen pituus. m kuvaa yksikköä metri.

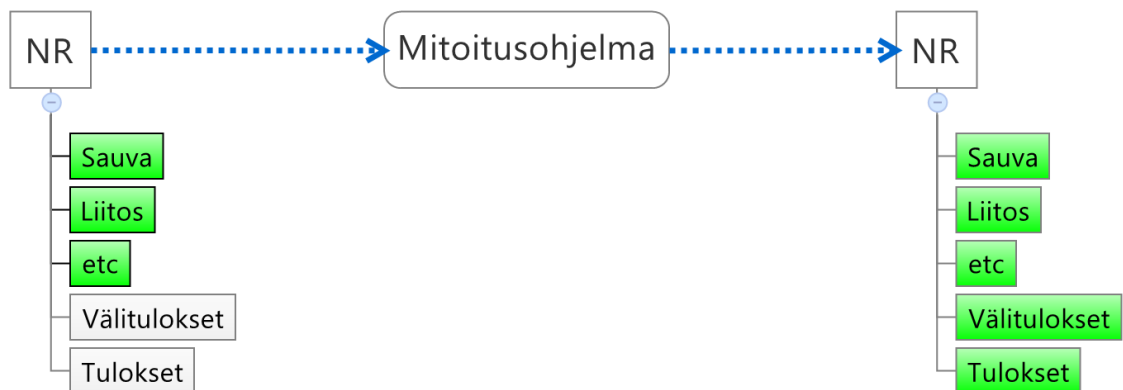
Vähimmäisvoima päätettiin toteuttaa kuormittamalla kutakin tartunta-alaa vuorotellen kääntämällä voimaa tietyn astemäärän välein. Tämä voima jaetaan tartunta-alan levysaumoilta ja välitetään tartunnalle ja levylujuuden laskennalle.

## 6 OHJELMAN RAKENNE

Matlab on funktionaalinen ohjelmointikieli. Näin ollen funktiot pystyvät vaikuttamaan ohjelman etenemiseen ainoastaan paluuarvojensa kautta.

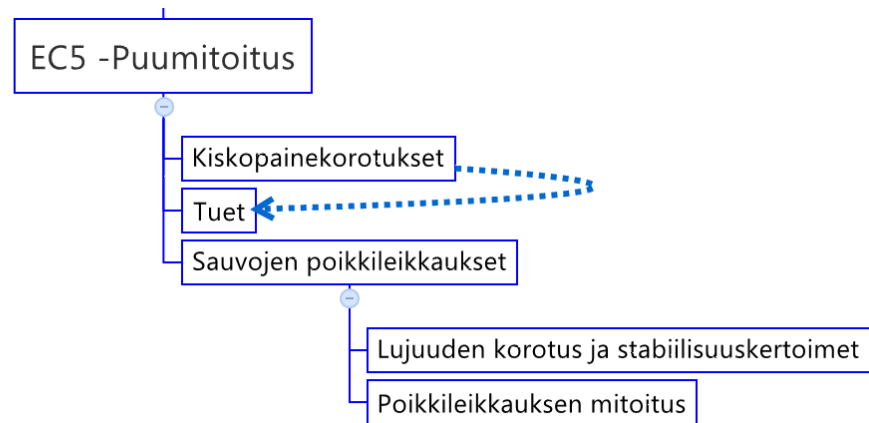
Mitoitusohjelma toteutettiin niin, että sillä voidaan laskea sekä naulalevyrakennne, että pelkkä puurakenne ilman naulalevyjä. Kumpaakin toiminnallisuutta varten toteutettiin omat pääfunktiot, jotka kutsuvat yhteisiä työfunktioita.

Mitoitusohjelma tarjoaa käyttäjälle kaksi funktiota, joista toinen saa parametrina naulalevyristikkoa kuvaavan tietorakenteen ja toinen pelkkää puuristikkoa kuvaavan tietorakenteen. Nämä tietorakenteet sisältävät kentät myös laskennan tuloksille ja välituloksille, kuten käyttöasteille ja kapasiteeteille. Mitoitusohjelma täyttää nämä kentät ja palauttaa käyttäjälle täydennetyn tietorakenteen. Käyttäjälle näkyvät osat NR- mitoituksen osalta on esitetty kuvassa 6.1. Puumitoitus on rakenteeltaan samankaltainen.

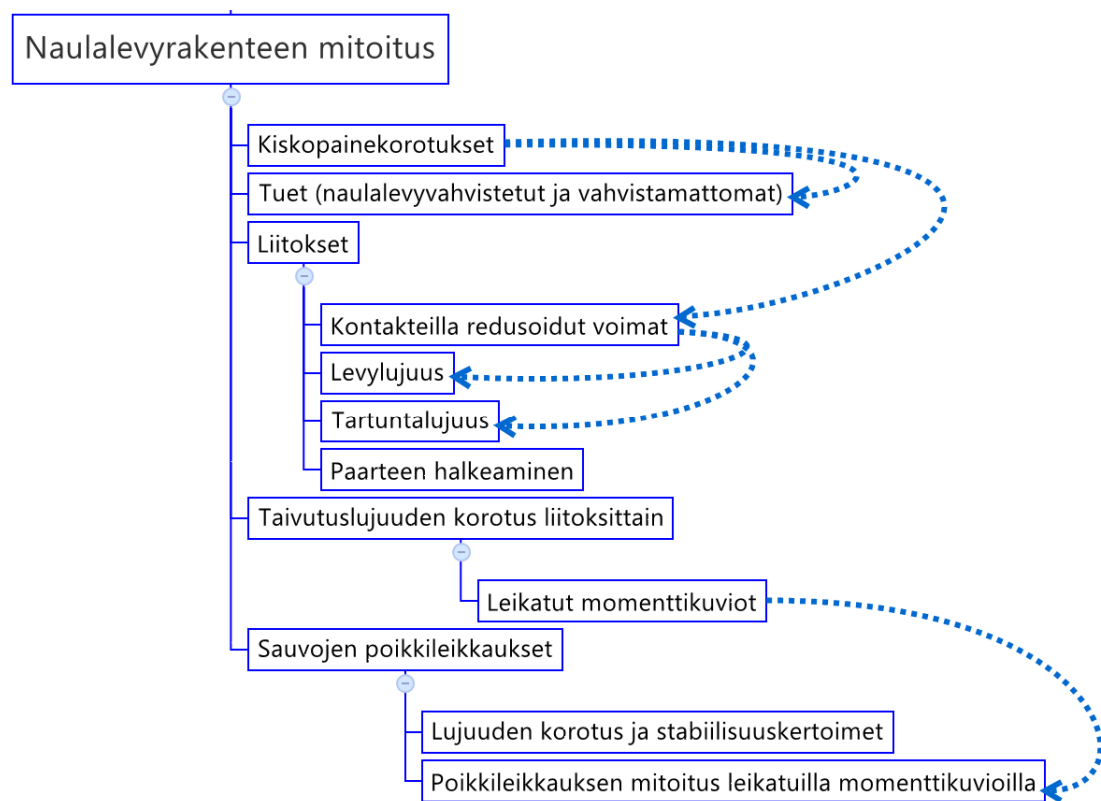


**Kuva 6.1: Käyttäjälle näkyvät mitoitusohjelman osat.**

Puumitoituksen eteneminen on kuvattu kuvassa 6.2. Suoritus etenee ylhäältä alas. Nuolet kuvaavat välituloksia, joita käytetään laskennan myöhemmissä vaiheissa. Näiden järkevä käsittely tuotti oman haasteensa ohjelman toteutuksessa. Vastaava kaavio NR-mitoitukselle on esitetty kuvassa 6.3.



**Kuva 6.2: EC5 –puumitoituksen vuokaavio.**



**Kuva 6.3: NR- mitoituksen vuokaavio.**



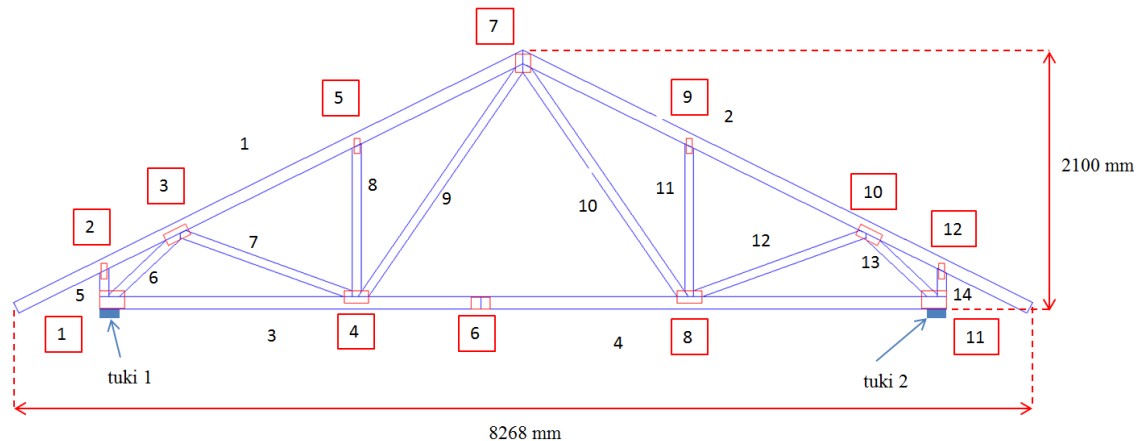
## 7 ESIMERKKITAPAUSTEN LASKENTA

Esimerkilaskennassa suoritettiin ristikon sauvojen poikkileikkauksen mitoitus ja yhden tavallisen liitoksen ja yhden parrejatkoksen mitoitus. Taivutuslujuuden korotus – ominaisuutta ei hyödynnetty.

### 7.1 Esimerkkiristikko

Mitoitusohjelman testaukseen käytettiin kuvassa 7.1 esitettyä ristikköä. Kuvassa on esitetty valittu liitos- ja sauvanumerointi. Tuloksia verrattiin vanhaan NR -ohjelmaan, WoDe 2000:een. Ristikon materiaali- ja poikkileikkaustiedot on esitetty taulukossa 7.1.

Ristikkoa kuormitettiin yläpaarteeseen kohdistuvalla lumikuormalla. Tämä on esitetty kuvassa 7.2. Tässä esiintyvä kerroin 0,8 on lumelle käytettävä muotokerroin.

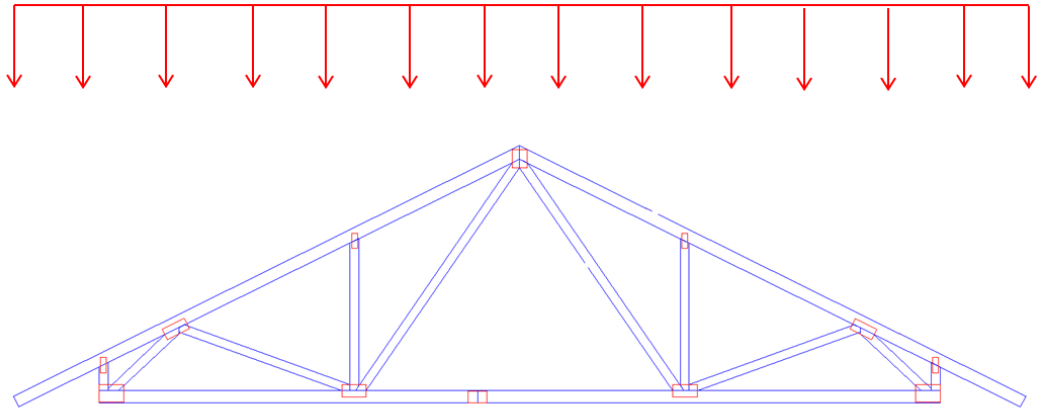


**Kuva 7.1: Esimerkkiristikko. Paljaat numerot ovat sauvojen numeroita ja laatikoidut liitosten.**

**Taulukko 7.1: Sauvojen materiaalit ja poikkileikkaustiedot.**

	Materiaali	Poikkileikkauksen korkeus $h$ (mm)	Poikkileikkauksen leveys $b$ (mm)
Paarteet	C30	98	42
Uumasauvat	C24	73	42

KT 1: Lumikuorma yläpaarteelle:  $4 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot 0.8$ , aikaluokka 3



*Kuva 7.2: Esimerkkiristikon kuormitustapaus.*

## 7.2 Rakennemalli ja staattinen ratkaisu

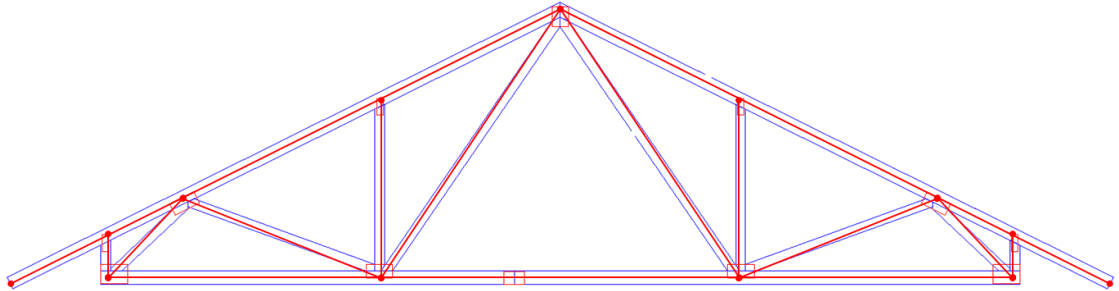
Tässä laskentaan käytettiin kolmea erilaista FE -mallia, jotka noudattavat karkeasti luvussa 2 esitettyjä rakennemalleja.

### 7.2.1 Käytetyt laskentamallit

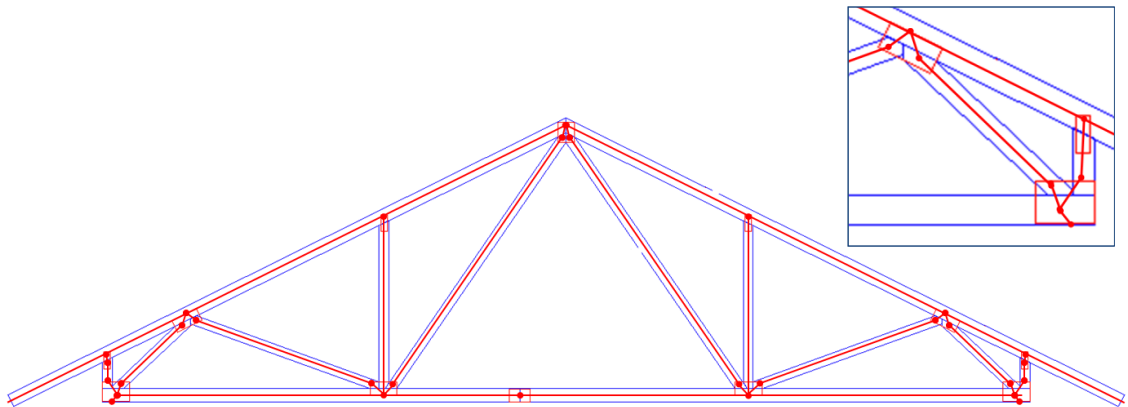
Käytetyt laskentamallit on esitetty seuraavassa.

- 1) Yksinkertainen malli, jossa uumasauvat kiinnittyvät nivelellisesti jatkuvina palkkeina mallinnettuihin paarteisiin, jolloin liitokset ovat keskeisiä. Vastaa luvussa 2.1 esitettyä yksinkertaista laskentamallia.
- 2) Uumasauvojen liitosten epäkeskisyydet on huomioitu jäykillä, kuvitteellisilla palkkielementeillä. Erona suunnitteluohjeen malliin on se, että jokaiselle uumasauvalle on luotu omat epäkeskisyyselementtinsä. WoDe sijoittaa tuet omien epäkeskisyyselementtiensä päähän. Tämän vaikutusta tuloksiin käsitellään myöhemmin.
- 3) Uumasauvojen päihin on lisätty rotaatiojouset. Tämän on tarkoitus vastata suunnitteluohjeessa esitettyä tarkinta rakennemallia. Erona on se, että tässä liitoksissa ei ole käytetty siirtymäjousia, ja rotaatiojouset on asetettu ainoastaan uumasauvojen päihin. Lisäksi rotaatiojäykkyys laskettiin pelkästään sauvan 5 ja liitoksen 2 väliselle tartunta-alalle ja käytettiin tätä arvoa kaikille uumasauvoille. Rotaatiojäykkyydelle käytettiin arvoa 9.2 kNm/rad.

Edellä kuvatut mallit on esitetty kuvissa 7.3 ja 7.4. Kuten johdannossa mainittiin, ristikon staattinen ratkaisu suoritettiin Mathcad –ohjelman päällä toimivalla FEM-Ratkaisijalla. Liitosten siirtymäjäykkyyksillä on merkittävä vaikutus rakenteen siirtymiin. Tämän vuoksi WoDe:n ja esimerkkilaskennan välisiä taipumia ei vertailtu.



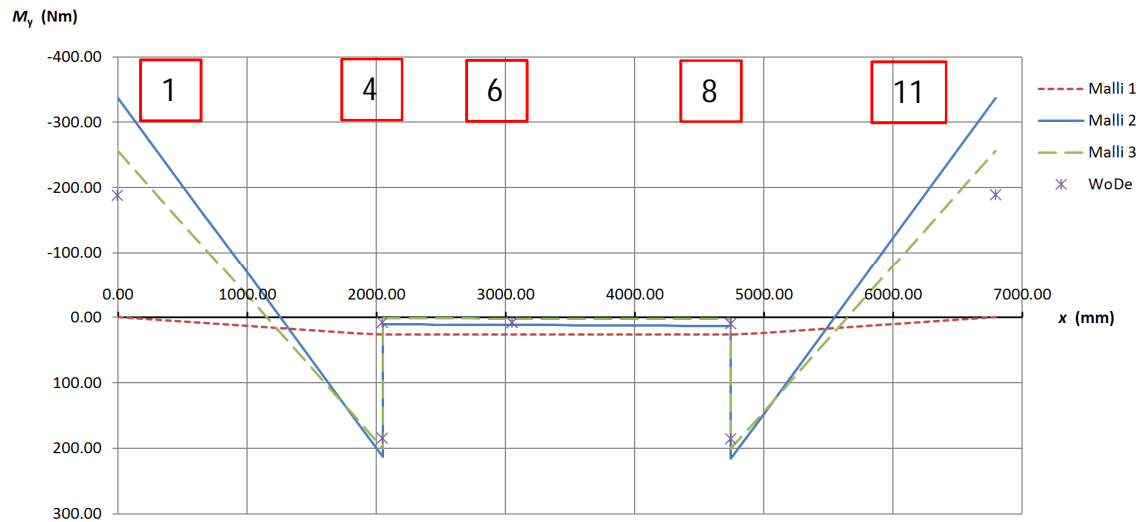
**Kuva 7.3: Yksinkertainen rakennemalli ilman epäkeskisyyksiä.**



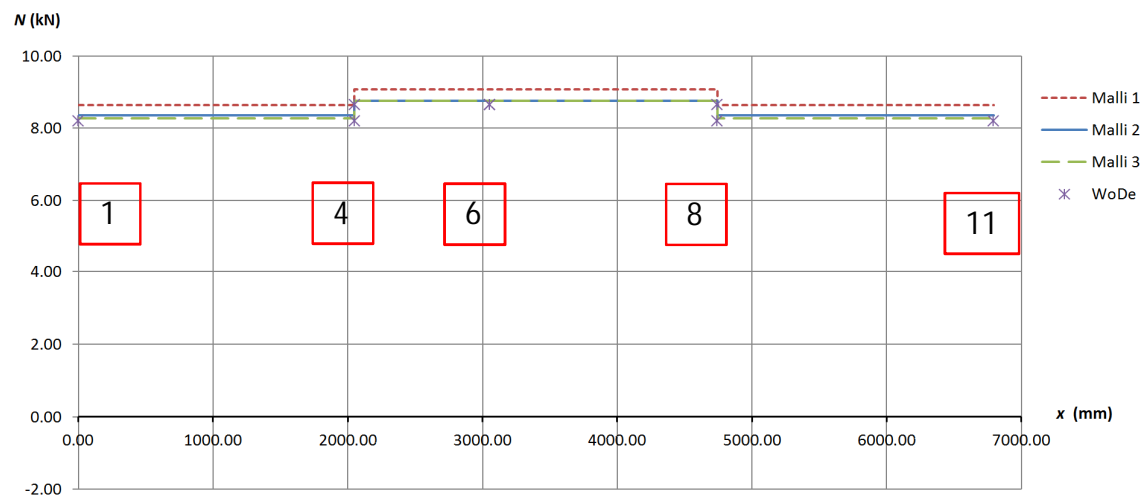
**Kuva 7.4: Rakennemalli epäkeskeisillä liitoksilla.**

## 7.2.2 Ratkaistut voimasuureet

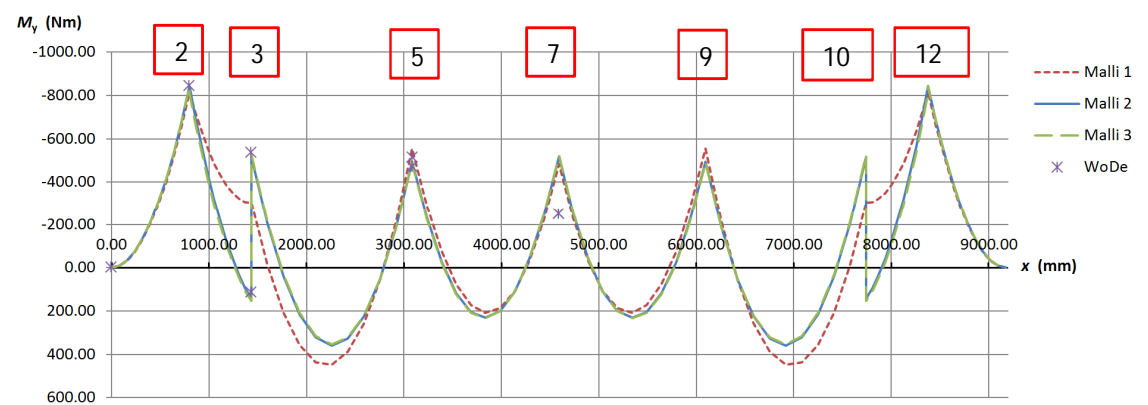
Ylä- ja alapaarteen momenttikuviot ja normaalivoimat eri laskentamalleilla on esitetty kuvissa 7.5 – 7.8. Näissä on myös WoDe:n arvot taitekohdissa. Y-akselilla on voimasuure, ja x –akselilla sauvan lokaali x-koordinaatti. Laatikoiden sisällä olevat numerot kuvaavat paarteilla sijaitsevien liitosten sijainteja.



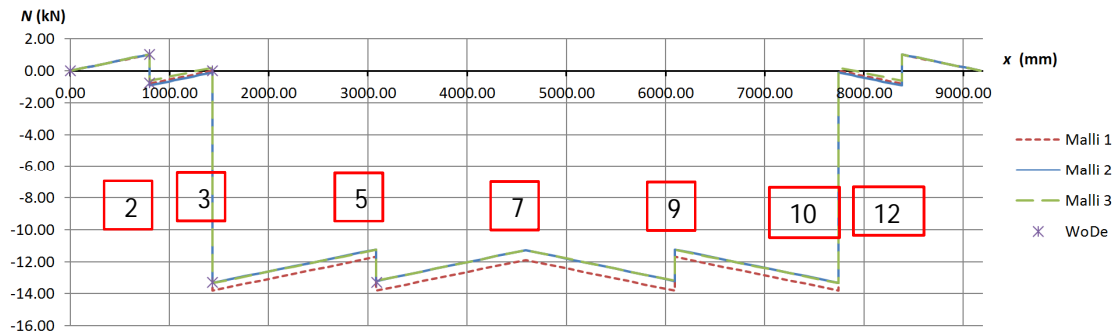
**Kuva 7.5: Alapaarteen taivutusmomenttikuviot malleilla 1-3 ja ääriarvokohdat WoDe:sta.**



**Kuva 7.6: Alapaarteen normaalivoima malleilla 1-3 ja ääriarvokohdat WoDe:sta.**



**Kuva 7.7: Yläpaarteen taivutusmomentti malleille 1-3 ja ääriarvokohdat WoDe:sta.**



**Kuva 7.8: Yläpaarteen normaalivoima malleille 1-3 ja ääriarvokohdat WoDe:sta.**

Alapaarteen momenttikuvioista nähdään, että epäkeskisyyksien lisääminen vaikuttaa ratkaisevasti päiden momenttikuvioon. Rotaatiojäykkyyden lisääminen parantaa tulosta edelleenkin jonkin verran. Uumasauvoja vertailtaessa huomattiin, että Wode laskee uumasauvoille suuremmat taivutusmomentit, kuin tässä käytetty esimerkkimalli. Ero alapaarteen momenttikuviossa johtui näistä. Tästä voidaan päätellä, että ero ei johdu sauvojen päihin sijoitettavien siirtymäjousien puuttumisesta.

Yläpaarteen momenttikuvioitakin tarkasteltaessa huomataan, että epäkeskisyyksien lisäämisellä on suuri vaikutus momenttikuvion muotoon. Epäkeskisyydet aiheuttavat taivutusmomenttikuvioon merkittävän hyppäyksen yläpaarteen toisen liitoksen kohdalla. Yläpaarteen keskellä havaitaan selkeä ero. Tämä johtuu siitä, että esimerkkimallissa yläpaarteen taitteellinen paarrejatkos mallinnettiin jäykkänä, kun taas WoDe käyttää tässä jousia, jotka pienentävät taitoksen jäykkyyttä, jolloin tämä kerää vähemmän momenttia. Rotaatiojäykkyyksien lisääminen ei juurikaan vaikuttanut yläpaarteen tuloksiin. Malleja 2 ja 3 on lähes mahdotonta erottaa toisistaan. On myös mielenkiintoista huomata, että mallin tarkentaminen ei vaikuta taivutusmomentin maksimiin – on totta, että taivutusmomentin maksimi syntyy räystäään alkukohtaan, mutta toiseksi suurin momenttihiippu esiintyy liitoksen 5 kohdalla, jonka suuruuteen mallin tarkentaminen ei juurikaan vaikuta.

Normaalivoimien väliset erot olivat suhteessa huomattavasti pienemmät, kuin momenttien. WoDe:n ja epäkeskisyyksiä käyttävien laskentamallien välillä oli hyvin pieni ero.

Uumasauvojen normaalivoimat on esitetty taulukossa 7.2. Sauvoihin ei kohdistu ulkoisia kuormia, joten normaalivoima on vakio sauvan matkalla. Taulukosta havaitaan, että laskentamallin tarkentamisella ei ole suurtakaan vaikutusta uumasauvojen normaalivoimiin.

Ristikön tukireaktiot eri malleilla on esitetty taulukossa 7.3. Tukireaktiot ovat kaikilla malleilla lähes samat, joten voidaan olla varmoja, että kuormat on annettu oikein. Ero yksinkertaisen rakennemallin ja kahden muun välillä johtuu siitä, että yksinkertaisella rakennemallilla yläpaarteen elementti päättyy fyysisen sauvan päähän. Tarkeimmat rakennemallit jatkavat elementtiä niin, että elementin pää on suoraan yläpaarteen uloimman kulman alla.

Koska uumasauvojen ja yläpaarteen rasitukset ovat verrattain lähellä toisiaan sekä WoDe:lla, että tässä käytetyllä rakennemallilla laskettuna, voidaan näitä käyttää mitoitusohjelmassa.

**Taulukko 7.2: Uumasauvojen normaalivoimat eri laskentamalleilla.**

	Ilman epäkeskisyysä	Epäkeskisyysillä	Suuntaa antavilla rotaatiojousilla	WoDe
Uumasauvojen normaalivoima (kN)				
5	-4,10	-4,85	-4,70	-4,10
6	-12,51	-11,80	-12,06	-12,51
7	3,08	2,81	2,92	3,08
8	-4,75	-4,48	-4,45	-4,75
9	4,33	3,94	3,92	4,33
10	4,33	3,93	3,92	4,33
11	-4,75	-4,48	-4,45	-4,75
12	3,08	2,80	2,91	3,08
13	-12,51	-11,80	-12,06	-12,51
14	-4,10	-4,85	-4,70	-4,10

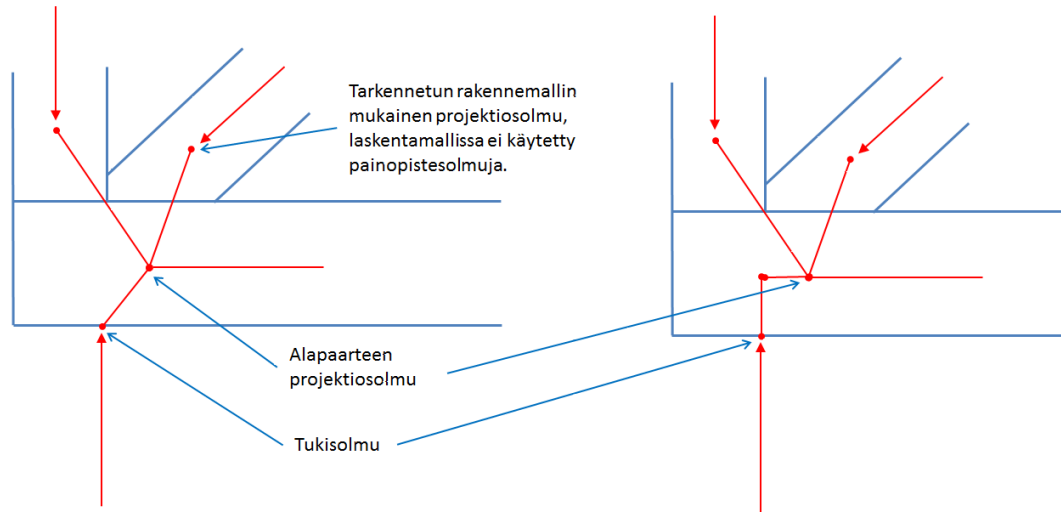
**Taulukko 7.3: Ristikön tukireaktiot eri laskentamalleilla.**

Reaktio (kN)	Ilman epäkeskisyysä	Epäkeskisyysillä	Suuntaa antavilla rotaatiojousilla	WoDe
T1 <sub>x</sub>	0,00	0,00	0,00	0,0
T1 <sub>y</sub>	13,16	13,23	13,23	13,2
T2 <sub>x</sub>	0,00	0,00	0,00	0,0
T2 <sub>y</sub>	13,16	13,23	13,23	13,2

### 7.2.3 Epäkeskeisesti mallinnetun tuen vaikutus alapaarteeseen taivutusmomenttiin.

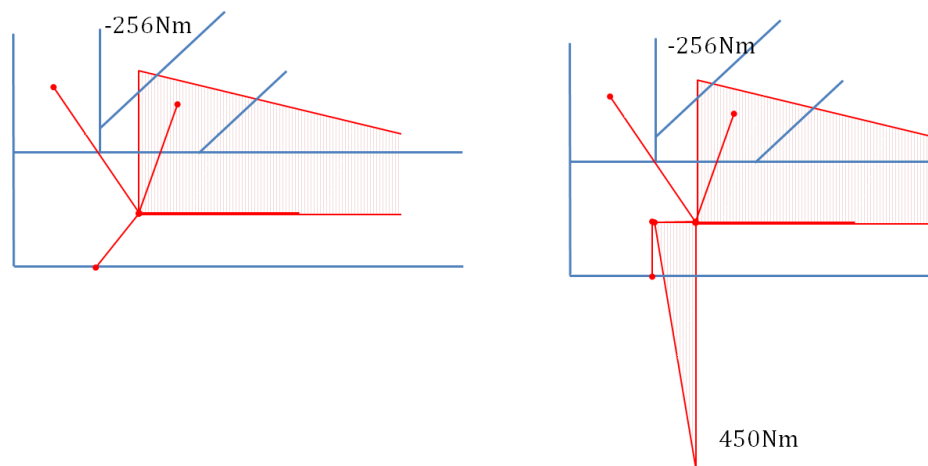
Kuten aiemmin todettiin, alapaarteeseen päässä olevat tuet on mallinnettu epäkeskeisesti elementeillä, jotka yhdistävät ne alapaarteeseen projektiosolmuihin. Projektiosolmun käsite on esitetty aiemmin kuvassa 2.4. Koska tuen välittämä voima kohdistuu puuhun, tämä pitäisi yhdistää kohtisuorasti alapaarteeseen systeemilinjaan.

Sekä laskennassa käytetty malli, että keskeisesti mallinnetulla tuella mallinnettu malli on esitetty kuvassa 7.9. Kuvaan on piirretty vaikuttavien voimien suuntavektorit.



**Kuva 7.9: Alapaarteeseen vasemman nurkan FE-mallit. Vasemmalla epäkeskeisesti mallinnettu tuki ja oikealla keskeisesti mallinnettu tuki.**

Kuvasta voidaan päätellä, että tuki pienentää alapaarteeseen projektiosolmulle tulevaa taivutusmomenttia. Vertailun vuoksi tuki ristikon voimasuureet ratkaistiin kummankin mallin mukaisesti. Alapaarteeseen pään taivutusmomentti kummallakin mallilla on esitetty kuvassa 7.10.



**Kuva 7.10: Paarteeseen pään momenttikuvio epäkeskeisesti ja keskeisesti mallinnetulla tuella.**

Kuvasta nähdään, että keskeisesti mallinnettu tuki aiheuttaa hyvin suuren hyppäyksen momenttikuvioon ja suurentaa merkittävästi sauvan kokonaiskäyttöastetta. Käytännössä tällainen malli tuskin kuitenkaan vastaa todellisuutta, sillä voimat ja momentit eivät välity pistemäisesti, vaan koko naulalevyn / kontaktin matkalta. Lisäksi naulalevy vahvistaa puuta kohtisuoran puristuksen osalta ottaen osan tukivoimasta. Tuen mallintaminen epäkeskeisesti approksimoi näitä ilmiöitä.

### 7.3 Sauvojen mitoitus

Mitoitusta varten kirjoitettiin Matlab -koodi, joka lukee Mathcad FEM:n rakennemallin ja tulokset tiedostosta ja muodostaa näiden perusteella tietorakenteen EC5 – puumitoitusta varten. Sauvojen mitoituksen käyttöasteet on esitetty taulukossa 7.4.

**Taulukko 7.4: Sauvojen käyttöasteet**

	Ilman epäkeskisyksiä	Epäkeskisyksillä	Suuntaa antavilla rotaatiojousilla	WoDe
Yläpaarre				
1	70 %	68 %	69 %	64 %
2	70 %	68 %	69 %	64 %
Alapaarre				
3	19 %	40 %	34 %	33 %
4	19 %	40 %	34 %	33 %
Uumasauvat				
5	1 %	2 %	9 %	7 %
6	49 %	46 %	50 %	60 %
7	11 %	10 %	12 %	13 %
8	43 %	41 %	42 %	44 %
9	15 %	14 %	14 %	17 %
10	15 %	14 %	14 %	17 %
11	43 %	41 %	42 %	44 %
12	11 %	10 %	12 %	13 %
13	49 %	46 %	50 %	60 %
14	1 %	2 %	9 %	7 %

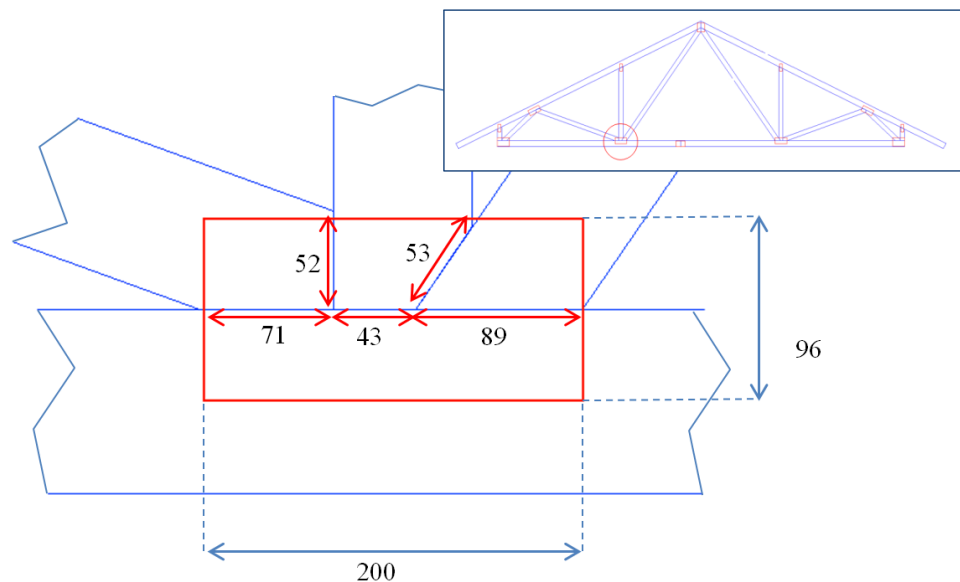
Yläpaarteiden tuloksissa on hieman eroa WoDe:n ja tarkimman mallin välillä. Alapaarteiden tulokset ovat lähes samat, niin kuin rakennemallin perusteella voi odottaa. Uumasauvojen käyttöasteissa ei ole suuria eroja, mikä on linjassa rakennemallista saatujen tulosten kanssa – normaalivoimassa ei ollut suuria eroja, ja tämä on määräävä, sillä uumasauvojen momentit ja leikkausvoimat ovat pieniä.



Uumasauvojen rakennetason suuntaisena ja kohtisuorana nurjahduspituutena käytettiin sauvan pituutta keskilinjalla suunnitteluohjeen mukaisesti. Paarteiden tason suuntainen nurjahduspituus määritettiin luvun 4.3.8 mukaisesti. WoDe ei määritä rakennetasoa vastaan kohtisuoralle nurjahdukselle käyttöastetta, vaan ilmoittaa suoraan vaaditun nurjahdustuentavälin. Tämän vuoksi paarteiden rakennetasoa vastaan kohtisuora nurjahdus jätettiin huomioimatta esimerkkilaskennassa.

## 7.4 Liitosmitoitus

Liitosmitoitusta varten ristikosta valittiin liitos numero 4. Liitos tärkeimpine mittoineen on esitetty kuvassa 7.11. Laskennassa kuvan mitoista vähennettiin sijoitustoleranssit.



**Kuva 7.11: Esimerkkiliitos ja sen sijainti ristikossa (yksiköt millimetrejä).**

Kun tuloksia verrattiin vanhan NR –ohjelman kanssa, oli näissä merkittäviä eroja. Syyinä tähän on se, että koodit jakavat voimat levysaumoille eri tavalla ja käyttävät puukontakteja hyödyksi toisistaan eroavasti –WoDe ei käytä uumasauvojen välisiä kontakteja hyödyksi. Näistä syistä liitosmitoitus esitetään yksityiskohtaisesti välituloksineen, koska pelkkiä käyttöasteita vertailemalla ei voida osoittaa mitoitusohjelman toimivuutta.

Tämän liitoksen lisäksi mitoitusohjelmalla mitoitettiin esimerkkiristikon paarrejatkos WoDe:sta otetuilla kuormilla. Paarrejatkoksessä on vain yksi liitossauma, jolloin voimien jakaminen muuttuu yksiselitteiseksi tehtäväksi ja kumpikin ohjelma antaa samat käyttöasteet.

### 7.4.1 Käytetty naulalevy

Ristikossa käytettiin Lahti Levy Oy:n valmistamia LL13 –naulalevyjä. Naulalevyn mekaaniset ominaisuudet otettiin VTT:n naulalevylausunnosta VTT-S-03259-12 (23). Lauseinto on vuodelta 2012. Tartuntalujuuden laskentaparametrit havusahatavaralle on esitetty taulukossa 7.5.

Tartuntalujuuden ominaisarvo C24 –lujuusluokan sahatavaralle kulmien  $\alpha$  ja  $\beta$  funktiona on esitetty kuvassa 7.12. Varsinainen laskentalujuus on tätä pienempi ja riippuu kuorman aikaluokasta, kuten on aiemmin kerrottu. Kuvasta nähdään, että ominaislujuus vaihtelee välillä 1,67 ... 2,93 MPa. Tartuntalujuus voi siis huonoimmillaan olla 57% maksimiarvosta.

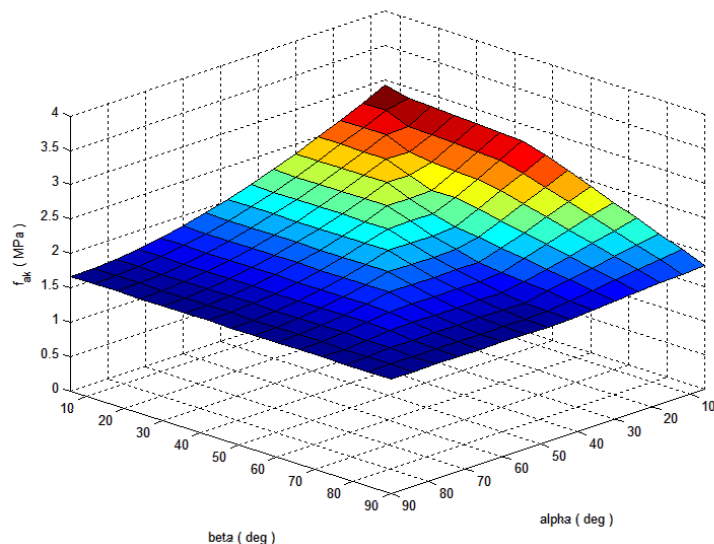
Levylujuuden laskentaparametrit on listattu taulukossa 7.6. Taulukosta nähdään, että puristetun naulalevysauman lujuus on noin puolet, kuin vedetyn lujuudesta. Toisaalta suunnitteluohjeen mukaan kontaktilla voidaan ottaa 50% puristavasta kuormasta, jolloin puristetulle saumalle voidaan käytännössä kohdistaa yhtä paljon kuormaa kuin vedetylle.

**Taulukko 7.5: Tartuntalujuuden laskentaparametrit.**

$f_{a,0,0,k}$ (Mpa)	$f_{a,90,90,k}$ (Mpa)	$k_1$ (MPa)	$k_2$ (MPa)	$\alpha_0$ (°)
3,52	1,91	-0,004	-0,027	0,759218

**Taulukko 7.6: Levylujuuden laskentaparametrit.**

Lujuudet (N/mm)					
$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{v,0,k}$	$f_{v,90,k}$
264	192	111	111	123	97
Muut parametrit					
$\gamma_0$ (°)			$k_v$		
25			0,53		

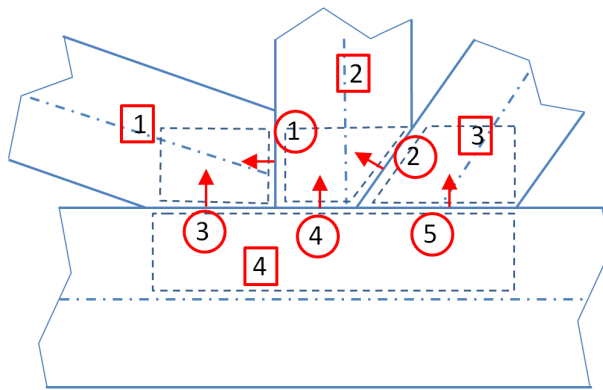


**Kuva 7.12: Tartuntalujuuden ominaisarvo kulmien  $\alpha$  ja  $\beta$  funktiona.**

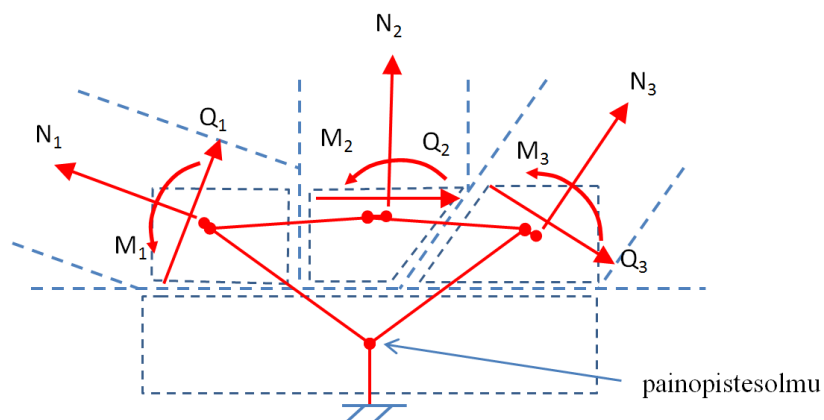
### 7.4.2 Liitoksen laskentamalli ja liitosvoimat

Valittu esimerkkiliitos mallinnettiin luvussa 2.3 esitetyn tarkennetun rakennemallin mukaisesti. Tämän yksittäisen liitoksen kuormitukset otettiin globaalin mallin sauvavoimista. Esimerkkiliitoksen tartunta-alojen ja levysaumojen numerointi on esitetty kuvassa 7.13. Laatikoissa olevat numerot ovat tartunta-alojen numeroita, ja ympyröidyt numerot kontaktipintojen/naulalevysaumojen numeroita. Nuolet ovat kontaktipintojen normaaleja.

Suunnitteluohjeen mukainen liitoksen FE -malli liitosta rasittavine sauvavoimien on esitetty kuvassa 7.14. Malli on tuettu paarteen projektiosolmusta, jolloin paarteen tartunta-alaan kohdistuvat rasitukset saadaan tasapainoehdoista.



**Kuva 7.13: Kontaktipintojen ja tartunta-alojen numerointi.**



**Kuva 7.14: Liitoksen elementtimalli rasituksineen.**

Sauvavoimien arvot eri laskentamalleilla ja WoDe:sta otettuna on esitetty taulukossa 7.7. Huomaa, että malleissa 1 ja 2 ei ole leikkausvoimaa eikä momenttia, koska uumasauvat kiinnittyvät paarteisiin nivelellisesti. Taulukossa esitetyt voimat kohdistuvat sauvojen keskiviivoilla sijaitseviin projektiosolmuihin. Taulukosta nähdään, että rotaatiojäykkyydet ovat sangen pieniä –sauvojen leikkausvoima on käytännössä merkityksetön. Epäkeskisyyksien lisäämisellä on pieni vaikutus liitoksen rasitukseen. WoDe:en nähden uumasauvojen sauvavoimilla ei ole suurtakaan eroa erilaisesta rakennemallista huolimatta.

Mitoituksessa käytetyt painopistesolmuissa vaikuttavat voimat esitetään taulukossa 7.8. Voimien arvot ovat puolet edellisestä taulukosta, koska liitoksessa on kaksi naulalevyä –yksi kummallakin puolella. Momentteihin on lisätty projektioelementeistä johtuva epäkeskisyys.

***Taulukko 7.7: Liitokseen kohdistuvat sauvavoimat.***

	Malli 1	Malli 2	Malli 3	WoDe
N (kN)				
1	1,54	2,81	2,91	2,98
2	-2,37	-4,48	-4,45	-4,63
3	2,16	3,94	3,92	4,15
Q (kN)				
1	0,00	0,00	0,00	0,01
2	0,00	0,00	-0,01	-0,01
3	0,00	0,00	0,00	0,01
M (Nm)				
1	0,00	0,00	5,18	-16,6
2	0,00	0,00	-4,67	14,6
3	0,00	0,00	0,24	14,0

**Taulukko 7.8: Liitosvoimien perusarvot.**

	Malli 1	Malli 2	Malli 3
$F_{Ed}$ (kN)			
1	1,54	1,40	1,46
2	2,46	2,32	2,32
3	2,28	2,08	2,08
4	0,22	0,24	0,27
$M_{Ed}$ (Nm)			
1	-1,98	-2,06	0,47
2	19,48	18,36	20,78
3	-9,32	-8,37	-8,26
4	90,55	84,48	80,64

Rotaatiojäykkyydellä on suhteellisen iso merkitys tartunta-alaan kohdistuvaan momenttiin. Tämä voi myös tarkoittaa sitä, että projektiosolmusta johtuvan epäkeskisyyden vaikutus tartunta-alan momenttiin on pieni.

Seuraavassa keskitytään tarkimman laskentamallin liitoksen mitoitukseen. Myöhemmin vertaillaan käyttöasteita eri laskentamallien välillä. Tässä ei oteta kantaa siihen, millä menetelmällä liitosalueen voimat on jaettu liitossaumoille.

### 7.4.3 Kontaktit

Levysaumojen voimat ja kontakteilla redusointi esitetään taulukossa 7.9. Kontakteissa ei ole hyödynnetty kiskopainekorotuksia.

**Taulukko 7.9: Liitoksessa vaikuttavat puristuskontaktit.**

Sauma / kontaktipinta	$F_d$ (kN)	$N_d$ (kN)	$R_{cd}$ (kN)	$F_{cd}$ (kN)	$F_{Ad}$ (kN)	ur
1	0,89	0,82	0,00	0,00	0,89	0 %
2	0,64	-0,64	1,62	0,32	0,32	20 %
3	0,57	0,15	0,00	0,00	0,57	0 %
4	2,00	-1,51	1,56	0,75	1,52	48 %
5	2,05	1,24	0,00	0,00	2,05	0 %

Taulukossa  $F_d$  on levysaumassa vaikuttava redusoimaton voima ja  $N_d$  levysauman normaalin suuntainen komponentti, jossa positiivinen arvo on vetoa.  $R_{cd}$  ja  $F_{cd}$  ovat kontaktissa olevan puun puristuslujuus ja kontaktissa hyödynnetty puristava voima yhtä naula-levyä kohden, eli toisin sanoen puolet koko kontaktipinnan arvoista.  $F_{Ad}$  on naulalevyn

välittämä, kontakteilla redusoitu voima. Viimeisenä on kontaktissa puristetun puun käyttöaste.

Taulukosta nähdään, että ainakaan tässä tapauksessa puu ei tullut mitoittavaksi tekijäksi, vaan täydet 50% puristavasta komponentista voitiin ottaa kontaktilla. Kisko-painekorotuksia ei siis tarvita ainakaan tässä esimerkissä. Kontakteilla redusoidut liitosvoiman perusarvot on esitetty sekä WoDe:lle, että mitoitusohjelmalle talulukossa 7.10. Momenteja ei ole esitetty tässä, sillä niillä oli pieni vaikutus käyttöasteisiin. Laskennassa ne kuitenkin on huomioitu.

***Taulukko 7.10: Kontaktilla redusoitujen liitosvoimien vertailu.***

	Mitoitusohjelma		WoDe	
Tartunta-ala	$F_{Ed}$ (kN)	$F_{A,Ed}$ (kN)	$F_{Ed}$ (kN)	$F_{A,Ed}$ (kN)
1	1,46	1,46	1,49	1,57
2	2,32	1,37	-2,32	2,22
3	2,08	2,04	2,08	2,08
4	0,27	0,68	-	0,25

Mitoitusohjelma näyttäisi hyödyntävän kontakteja tehokkaammin sauvan 2 kohdalla. Tämä voi johtua siitä, että WoDe ei käytä sauvojen 2 ja 3 välistä kontaktia.

#### **7.4.4 Levylujuus ja tartunta**

Saumojen ja tartunnan käyttöasteet on esitetty taulukossa 7.11. Vertailun vuoksi laskenta suoritettiin sekä kontakteilla, että ilman. Taulukossa on myös esitetty vanhan NR-ohjelman tulokset. Levylujuuden osalta käyttöasteita ei kuitenkaan voida juuri verrata, koska ohjelma jakaa voimat levysaumoille eri periaatteella. WoDe:n tuloksia tutkittaessa ei myöskään voitu olla varmoja siitä, miten levylujuuden käyttöasteita tulisi tulkita.

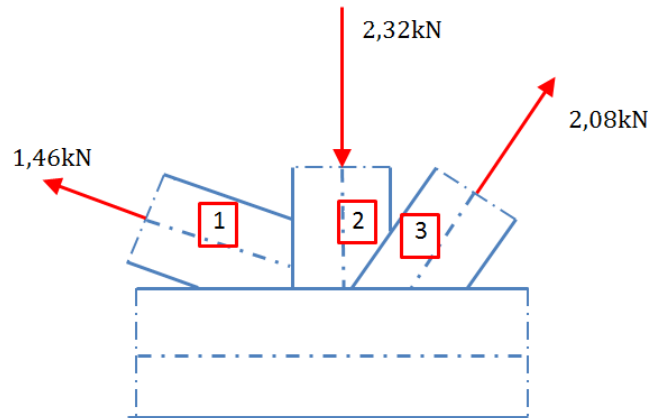
**Taulukko 7.11: Levylujuuden ja tartunnan mitoitus.**

	Ei kontakteja	Kontaktit käytössä	WoDe
Levylujuus			
1	9 %	9 %	30 %
2	17 %	9 %	46 %
3	8 %	8 %	14 %
4	44 %	33 %	19 %
5	19 %	19 %	12 %
Tartunta			
1	33 %	32 %	38 %
2	108 %	67 %	87 %
3	51 %	54 %	49 %
4	10 %	11 %	10 %

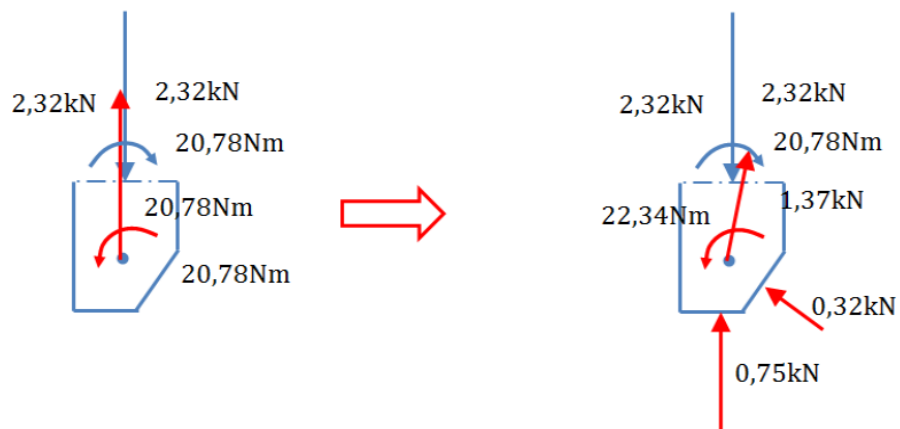
Sauvan 3 tartunnan tulos on mielenkiintoinen –kontaktien käyttö kasvattaa tartunnan käyttöastetta. Paneudutaan tähän tarkemmin. Liitosvoimat sauvoittain on esitetty kuvassa 7.15. Sauvan 2 tartunta-alan vapaakappalekuva sekä kontakteilla, että ilman on esitetty kuvassa 7.16. Kuvasta nähdään, että kontaktin käyttö pienentää vaadittua liitosvoimaa merkittävästi. Kuvaan piirretyt sauvan päässä vaikuttavat voimat vaikuttavat todellisuudessa painopistesolmuun puun puolelta. Nämä piirrettiin kuitenkin sauvan päähän, jotteivät ne sekoittuisi voimiin, jotka vaikuttavat painopistesolmuun naulalevyn puolelta.

Oikeassa alanurkassa oleva kontakti vaikuttaa kuitenkin sauvan 3 liitosvoimaan. Sauvan 3 tartunta-alan voimat ja kontaktien vaikutus on esitetty kuvassa 7.17. Kontakti kasvattaa tartunta-alan kohdistuvaa taivutusmomenttia ja lisää täten tartunnan käyttöastetta. Kokonaisuutena liitos kuitenkin kestää paremmin.

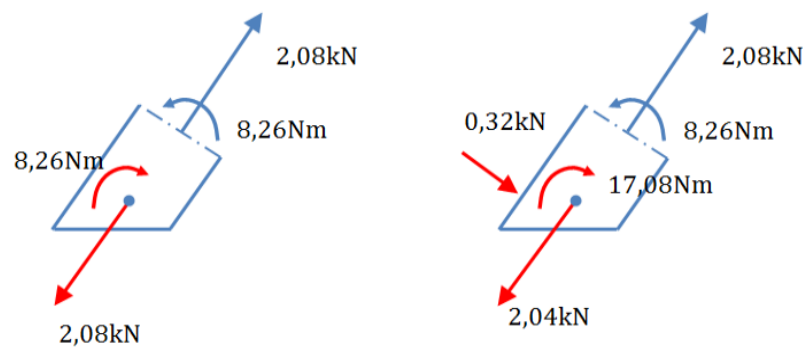
On mahdollista, että joissain tapauksissa kontaktia ei kannata käyttää liitoksen kapasiteetin kasvattamiseen. Oma lukunsa on, että onko todellisessa liitoksessa kontakteja. Puu on niin epälineaarinen materiaali, että tätä on vaikea tietää tällaisella laskennalla.



**Kuva 7.15: Liitosvoimat sauvoittain.**



**Kuva 7.16: Kontaktien vaikutus sauvan 2 liitosvoimaan ja -momenttiin.**



**Kuva 7.17: Kontaktien vaikutus sauvan 3 liitosvoimaan ja -momenttiin.**



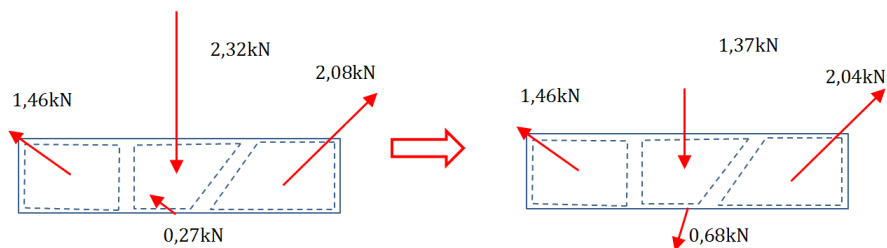
### 7.4.5 Paarteen halkeamistarkastelu

Paarteeseen kohdistuva vetävä voimakomponentti, vetävän voiman kapasiteetti ja käyttöaste on esitetty sekä kontakteilla, että ilman taulukossa 7.12.

**Taulukko 7.12: Paarteen halkeamistarkastelu.**

	Ei kontakteja	Kontaktit käytössä
$R_{FT}$ (kN)	6,7	6,7
$F_{FT}$ (kN)	0.0	1,3
$u_r$	0 %	19 %

Mielenkiintoista on, että kontaktien käyttö vaikuttaa paarteeseen kohdistuvaan repivään voimaan. Naulalevyn yläosan vapaakappalekuva ilman kontakteja ja kontaktien kanssa on esitetty kuvassa 7.18. Kuvaan ei ole piirretty momenteja.



**Kuva 7.18: Naulalevyn yläosan vapaakappalekuva kontakteilla ja ilman.**

Voidaan ajatella, että sauvalta 2 tuleva puristusvoima tasapainottaa sauvojen 1 ja 3 vetoa vasemman puoleisessa kuvassa. Kun kontaktit otetaan käyttöön, tulee sauvalta 2 vähemmän voimaa naulalevyille, jolloin uumasauvoilta tuleva resultantti muuttuu suuntaansa. Toisaalta tällöin parretta painavan kontaktin pitäisi kasvattaa paarteen halkeamiskapasiteettia. Tästä voidaan päätellä, että paarteen halkeamistarkastelu tarvitsee suorittaa ainoastaan redusoimattomille voimille.

### 7.4.6 Liitosmitoituksen vertailu eri laskentamallien välillä.

Levylujuuden ja tartunnan käyttöasteet on esitetty eri laskentamalleilta saaduille voimasuureille taulukossa 7.13 WoDe:n tulokset on esitetty vertailun vuoksi.

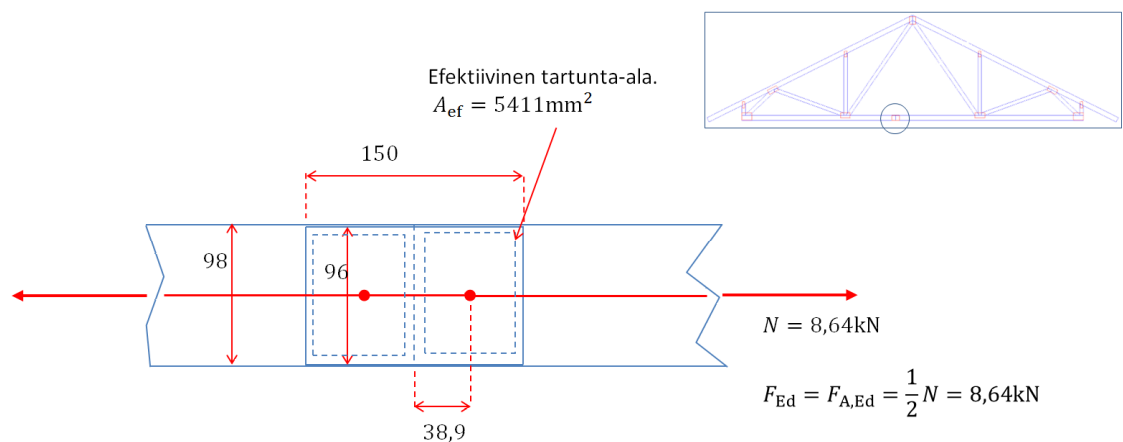
**Taulukko 7.13: Levylujuuden ja tartunnan käyttöasteet eri laskentamalleilla.**

	Malli 1	Malli 2	Malli 3	WoDe
Levyseammat				
1	10 %	10 %	9 %	30 %
2	11 %	8 %	9 %	46 %
3	9 %	7 %	8 %	14 %
4	33 %	32 %	33 %	19 %
5	21 %	19 %	19 %	12 %
Tartunta-alat				
1	35 %	27 %	33 %	38 %
2	72 %	51 %	68 %	87 %
3	59 %	49 %	54 %	49 %
4	13 %	10 %	11 %	10 %
Kokonaiskäyttöasteet				
<i>ur</i>	72 %	67 %	68 %	87 %

Taulukon perusteella mitoitusohjelma antaa optimaalisemman käyttöasteen kuin WoDe. Tartunta osoittautuu mitoittavaksi ilmiöksi.

#### 7.4.7 Liitosmitoituksen verifiointi yksinkertaisella paarrejatkoksella

Kuten aiemmin esitettiin, ei voimien jakaminen kontaktipinnoille ja levysaumoille ole yksiselitteinen tehtävä. Tämä voi osaltaan selittää WoDe:n ja uuden mitoitusohjelman tulosten eroa. Tämän vuoksi laskentaa päätettiin kokeilla esimerkkiristikön paarrejatkoksella. Tällöin liitoksessa on vain yksi kontaktipinta, jolloin voimien jakaminen on yksiselitteinen tehtävä. Liitos mitoitetaan ja rasituksineen on esitetty kuvassa 7.19. Liitoksen taivutusmomentti ja leikkausvoima ovat merkityksettä, joten ne jätettiin huomiotta.

**Kuva 7.19: Tutkittu paarrejatkos mittoineen ja rasituksineen.**

Laskennasta saadut käyttöasteet on esitetty taulukossa 7.14. Tartunta-alat ovat identtiset ja levysaumoja on vain yksi, joten näitä ei ole käyty erittelemään niin kuin aiemmin.

**Taulukko 7.14: Paarrejatkoksen käyttöasteet.**

	Mitoitusohjelma	WoDe
Levylujuus	18,75 %	18 %
Tartuntalujuus	35,44 %	35 %

WoDe ilmoittaa käyttöasteen vain kahden merkitsevän numeron tarkkuudella, joten tämän tarkempaa vertailua ei voitu suorittaa. Tartunta on kunnossa, mutta levylujuudessa on pieni ero.

Mitoitusohjelmassa käytetyt levylujuuden laskentaparametrit tarkistettiin naula-levylausunnosta ja liitoksen rasitukset tarkistettiin uudestaan. WoDe:n liitoksessa vaikuttaa pieni taivutusmomentti, mutta tämän pitäisi suurentaa käyttöastetta. Liitoksessa vaikuttava voima otettiin WoDe:sta. Tämän WoDe ilmoitti 10N tarkkuudella, joten WoDe:n käyttämä voima voi olla hieman pienempi. Tämä selittää eron käyttöasteessa.

## 7.5 Esimerkkilaskennasta tehtävät johtopäätökset

Esimerkkiliitoksessa kontaktien käytöllä oli ratkaiseva vaikutus kokonaiskäyttöasteeseen. Kontaktien käytössä puun puristuslujuus ei tullut mitoittavaksi, vaan sääntö, että enintään 50% voimasta voidaan ottaa kontaktilla. Tämän perusteella voidaan päätellä, että kiskopainekorotusten tehokas hyödyntäminen kontakteissa ei välttämättä paranna suunniteltuja rakenteita.

Liitosten epäkeskisyydellä oli suuri vaikutus tuloksiin, liitosten siirtymäjousien pois jättämisellä sen sijaan ei ollut järkevää suurta merkitystä voimasuureiden kannalta.

Diplomityön aikana mietittiin myös sitä, miten voimat voidaan jakaa naulalevysaumoihin mahdollisimman tehokkaasti. Tässä esimerkissä tartunta oli kuitenkin mitoittava – ei levylujuus. Tarkempaa tietoa varten pitäisi kuitenkin tutkia erilaisia ristikoita erilaisilla kuormituksilla.

## 8 JATKOKEHITYSIDEAT

Koska naulalevyristikoita valmistetaan paljon, on tärkeää pyrkiä mahdollisimman edullisiin rakenteisiin. Teoriassa tarkemmat mitoitusmenetelmät mahdollistavat edullisemmat rakenteet. Tuloksia voitaisiin mahdollisesti parantaa toteuttamalla taivutuslujuuden korotus -toiminnallisuus ja kehittämällä mahdollisimman tarkka menetelmä, joka jakaa liitosvoimat levysaumoille. Jotta tiedettäisiin, mihin kannattaa panostaa, pitäisi mitoitusohjelmaa testata enemmän ja erilaisilla ristikoilla –on mahdollista, että paarteilla normaalivoima on mitoittava, jolloin taivutuslujuuden korotus ei vaikuta paljoakaan vaaditun sauvan kokoon. Esimerkkiristikossa tartuntalujuus oli mitoittava –ei levyjuus, jolloin voimien jakamisella ei ollut suurta merkitystä.

NR –suunnittelija pyrkii optimoimaan ristikon mahdollisimman edulliseksi. Käytännössä suunnittelija laskee rakennetta erilaisilla mitoilla ja katsoo edullisimmat levy- ja sauvakoot, joilla rakenne kestää. Tätä tehtävää kannattaa pyrkiä tehostamaan. Liitosmitoituksessa esiintyy niin valtava määrä muuttujia, että matemaattisen teorian mukainen optimointi ei välttämättä ole kannattavaa, mutta suunnittelijan työtä voidaan kuitenkin helpottaa merkittävästi pienillä asioilla.

Nykyisellään mitoitusohjelma ottaa sisään suunnitellun rakenteen ja palauttaa käyttöasteet. Parempi menetelmä olisi laskea esimerkiksi tukileveydelle ja tason koh-tisuorille nurjahduspituuksille optimiarvot ja palauttaa ne. Mitoitusohjelma voisi myös laskea rakenteen astetta raskaammilla ja kevyemmilla sauvoilla, ja ilmoittaa käyttöasteet näille. Tällöin suunnittelija saisi heti käsityksen siitä, millainen vaikutus rakenteen vahvistamisella olisi, eikä tämän tarvitse kuluttaa aikaa erilaisten mittojen syöttämiseen.

Käytännössä naulalevyrakenteen topologia on verrattain vakio –NR –suunnittelija tietää suurin piirtein, miten liitokset ja sauvat kannattaa sijoittaa edullisesti, joten liitosten määrään ei pystytäkään vaikuttamaan. Sen sijaan liitosten tarkkaa sijaintia kannattaa optimoida. Ohjelmallinen optimointi voisi kokeilla siirtää liitosten ja naulalevyjen sijainteja ja tutkia, millä saadaan halvin rakenne.

## LÄHDELUETTELO

1. **Inspecta Sertifiointi OY.** *Naulalevyrakenteiden suunnittelu.* Espoo : Inspecta Sertifiointi OY, 2009.
2. **VTT.** *Naulalevylausunto Top-W naulalevyille.* VTT-S-08481-08. s.l. : VTT, 2008.
3. Inspecta Sertifiointi OY:n hyväksymät Eurokoodi 5 mukaiset NR-suunnitteluohjelmat. *Inspecta Sertifiointi OY.* [Online] 12. 12 2013. [Viitattu: 4. 02 2013.] <http://www.inspecta.com/fi/Palvelut/Sertifiointi/Sertifikaattihaku/NR-suunnitteluohjelmat/>.
4. Henkilöiden sertifiointiin liittyvät sertifikaattiluettelot. *Inspecta Sertifiointi OY.* [Online] 9. 7 2013. [Viitattu: 4. 2 2014.] [http://www.inspecta.com/fi/Palvelut/Sertifiointi/Sertifikaattihaku/Henkiloiden\\_sertifiointiin\\_liittyvat\\_sertifikaattiluettelot/](http://www.inspecta.com/fi/Palvelut/Sertifiointi/Sertifikaattihaku/Henkiloiden_sertifiointiin_liittyvat_sertifikaattiluettelot/).
5. **Kuula, Pekko.** *Kehäratkaisija Mathcad -ohjelmaan, Kandidaatin työ.* Tampere : s.n., 2011.
6. *SFS-EN 1995-1-1:2004(E) Eurocode 5: Design Design of timber structures. General - Common rules and rules for buildings.* 2004.
7. **Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.** *RIL 205-1-2009.* s.l. : Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2009.
8. **Porteus, Jack ja Kermani, Abdy.** *Structural Timber Design to Eurocode 5.* s.l. : Blackwell Publishing Ltd, 2007. ISBN: 978-14051-4638-8.
9. **Rakennustieto OY, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT).** *Puurakenteet STEPI.* Tampere : Rakennustieto OY, 1996. ISBN 951-682-393-9.
10. **Kauranen, Pekka.** *Selvitys Naulalevyliitoksen Jäykkyyydestä.* Tampere : Tampereen Teknillinen Korkeakoulu, 1979.
11. **Kevarinmäki, Ari.** *Semi-Rigid Behaviour Of Nailplate Joints.* Espoo : Helsinki University of Tehcnology - Laboratory of Structural Engineering and Building Physics, 2000. ISBN 951-22-4882-4.

12. —. *Naulalevyliitoksen toiminta - Osa 1: Naulalevyliitoksen toiminta*. Espoo : Teknillinen korkeakoulu. Talonrakennustekniikka, 1991. ISBN 951-22-0603-X.
13. **Leivo, Mika**. *On the stiffness changes in nail plate trusses*. Espoo : Technical research centre of Finland, 1991. ISBN 951-38-3949-4.
14. **Poutanen, Tuomo**. *Analysis of Timber Nail Plate Components*. Tampere : Tampere University Of Technology, 1995. ISBN 951-722-389-7.
15. *EN 14081-1:2005+A1 - Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 1: General requirements*. s.l. : SFS, 2011.
16. *SFS-EN 338*. s.l. : SFS, 2009.
17. *EN 14358:2006 (E): Timber structures - Calculation of characteristic 5-percentile values and acceptance criteria for a sample*. 2006.
18. *SFS-EN 1995-1-1:2004/A1:2008(E) Eurocode 5: Design Design of timber structures. General - Common rules and rules for buildings. Amendment A1*. 2008.
19. *EN 14545:2008 (E): Timber structures - Connectors - Requirements*. 2008.
20. *EN 1075:1999 - Timber structures. Test methods. Joints made with punched metal plate fasteners*. 1999.
21. **Olsson, A**. Probabilistic Analysis and Optimization of Roof Trusses. *Electronic Journal of Structural Engineering*. 2010, 10.
22. **VTT**. *Naulalevylausunto LL13 naulalevyille*. VTT-S-03259-12. s.l. : VTT, 2012.
23. *Naulalevylausunto paarrejatoksissa käytettävälle TOP-N naulalevyille*. VTT-S-10798-07. s.l. : VTT, 2007.
24. **Brush, Don O. ja Almroth, Bo O**. *Buckling of bars, plates and shells*. s.l. : McGraw-Hill, Inc, 1975. ISBN 0-07-008593-5.